

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program M2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Aplikace numerické simulace pro technologické procesy tváření

Application of numerical simulation for technological processes of
forming

Martin Plešivec
KSP – TP

Vedoucí diplomové práce:
Konzultant diplomové práce:

Ing. Pavel Doubek, Ph.D. – *TU v Liberci*
Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. – *TU v Liberci*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	71
Počet tabulek	07
Počet příloh	05
Počet obrázků	42

Datum: 25.5.2012

Anotace

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: M2341 – Strojní inženýrství

Diplomant: Martin Plešivec

Téma práce: Aplikace numerické simulace pro technologické procesy tváření
Application of numerical simulation for technological processes of forming

Číslo DP: KSP-TP

Vedoucí DP: Ing. Pavel Doubek, Ph.D. – *TU v Liberci*

Konzultant: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. – *TU v Liberci*

Abstrakt:

Jedním z možností strojního průmyslu pro dosažení kvalitního výrobku při minimálních nákladech patří numerická simulace. V současné době existuje celá řada numerických simulačních softwarů, od univerzálních až po vysoce specializované, jejichž přesnost výpočtů se liší.

Cílem práce je porovnat přesnost výpočtů tvářecích procesů dvou konkurenčních konečnoprvkových simulačních softwarů, PAM Stamp 2G a MSC.MARC/MENTAT a to jak plošných, které reprezentuje proces tažení kruhového přístříhu, tak objemových, jehož reprezentantem je proces ohýbání tlusté obdélníkové tyče. Výsledky simulace analýzy stavu deformace jsou porovnávány s experimentálním měřením.

Abstract:

One of the options of machinery industry for the achievement of a quality product at minimum cost is numerical simulation. Currently, there is a number of numerical simulation software, from the universal to highly specialized. The accuracy of their calculations differs.

The aim of my thesis is to compare the accuracy of calculations of two competing processes of forming FEM simulation software, PAM Stamp 2G and MSC.MARC/MENTAT both plate that represents the process of drawing rotating blank and volume, whose representative is the process of bending thick rectangular rod. The results of simulation analysis of the state of deformation are compared with experimental measurements.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 25. května 2012

.....

Martin Plešivec
Eliášova ul. 2244
470 01 Česká Lípa

Poděkování:

Zde, na tomto místě bych rád poděkoval všem odborným pracovníkům z Katedry strojírenské technologie - Oddělení tváření kovů a plastů i pracovníkům Katedry mechaniky, pružnosti a pevnosti, kteří mi pomáhali se zpracováním diplomové práce a bez nichž by tato práce nemohla vzniknout.

Především však musím poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Pavlu Doubkovi, Ph.D. za cenné připomínky, trpělivost a pomoc jak se zpracováním diplomové práce, tak s měřením hodnot v ní obsažené.

OBSAH:

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	8
1. ÚVOD	11
2. TEORETICKÁ ČÁST	12
2.1. TVÁŘENÍ KOVŮ	12
2.1.1. Rozdělení tvářecích procesů podle působení vnějších sil	12
2.2. TEORIE OHÝBÁNÍ	12
2.2.1. Napjatost a přetvoření při prostém ohybu	13
2.2.2. Neutrální osa	13
2.2.3. Výpočet ohybového momentu.....	14
2.1.3.1. Ohýbání bez zpevnění	15
2.1.3.1. Ohýbání se zpevněním	16
2.2.4. Odpružení při ohybu.....	17
2.3. TEORIE TAŽENÍ	18
2.3.1. Napjatost a deformace při tažení bez zeslabení stěny s přidržovačem	18
2.3.2. Výpočet tažné síly	19
2.4. STATICKÉ ZKOUŠKY KRÁTKODOBÉ	20
2.4.1. Statická zkouška tahem za normálních teplot	20
2.4.1.1. Průřezy zkušebních tyčí a jejich počáteční měřená délka	20
2.4.1.2. Pracovní diagram	21
2.4.1.3. Vyhodnocení pracovního diagramu	22
2.4.1.4. Výpočet základních normalizovaných parametrů	22
2.4.1.5. Výpočet skutečného napětí a deformace	24
2.4.1.6. Anizotropie mechanických vlastností.....	25
2.4.1.7. Deformační zpevnění	26
2.5. FOTOGRAMMETRIE	27
2.5.1. Optický měřicí systém ARGUS	28
2.5.2. Optický měřicí systém ARAMIS	29
2.6. NUMERICKÉ SIMULACE	30

2.6.1.	Základy metody konečných prvků	31
2.6.2.	PAM Stamp 2G	33
2.6.3.	MSC.MARC/MENTAT	35
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	37
3.1.	CÍL EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI	37
3.2.	MĚŘENÍ SKUTEČNÝCH HODNOT DEFORMACE φ POMOCÍ OPTICKÝCH MĚŘÍCÍCH SYSTÉMŮ	37
3.2.1.	Měření procesu ohýbání pomocí optického měřicího systému ARAMIS	37
3.2.2.	Měření procesu tažení pomocí optického měřicího systému ARGUS	40
3.3.	ZJIŠTĚNÍ HODNOT DEFORMACE φ POMOCÍ KONEČNOPRVKOVÝCH SIMULAČNÍCH SOFTWARE	42
3.3.1.	Zjištění koeficientu normálové anizotropie	43
3.3.1.1.	Příprava vzorků	43
3.3.1.2.	Statická zkouška tahem	44
3.3.2.	Zjištění koeficientu normálové anizotropie	46
3.3.2.1.	Příprava vzorků	46
3.3.2.2.	Statická zkouška tahem	46
3.3.3.	Definice procesů ohýbání a tažení v programu PAM Stamp 2G	48
3.3.4.	Definice procesů ohýbání a tažení v programu MSC.MARC/MENTAT	50
3.3.4.1.	Definice procesů ohýbání	50
3.3.4.2.	Definice procesů tažení	53
3.4.	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ NUMERICKÉ SIMULACE	56
3.4.1.	Vyhodnocení výsledků numerické simulace v programu PAM Stamp 2G	56
3.4.2.	Vyhodnocení výsledků numerické simulace v programu MSC.MARC/MENTAT.....	58
3.5.	ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	59
3.5.1.	Vytvoření počátečních bodů	59
3.5.1.1.	Určení počátečního bodu u ohybku	59
3.5.1.1.	Určení počátečního bodu u výlisku	60

3.5.2.	Zpracování získaných dat z procesu ohýbání ze softwaru Pam Stamp 2G a optického systému Aramis	60
3.5.3.	Zpracování získaných dat z procesu tažení ze softwaru Pam Stamp 2G	61
3.5.4.	Zpracování získaných dat z procesů ohýbání a tažení ze softwaru MSC.MARC/MENTAT	61
4.	DISKUZE VÝSLEDKŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	43
4.1.	DISKUZE VÝSLEDKŮ PRO PROCES OHÝBÁNÍ.....	62
4.2.	DISKUZE VÝSLEDKŮ PRO PROCES TAŽENÍ.....	64
5.	ZÁVĚR	67
6.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	69
7.	SEZNAM PŘÍLOH	71

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<u>Označení</u>	<u>Jednotka</u>	<u>Název</u>
a	[mm]	konečná tloušťka tyče
a_0	[mm]	počáteční tloušťka tyče
$A_{80\text{mm}}$	[%]	tažnost
b	[mm]	konečná šířka tyče
b_0	[mm]	počáteční šířka tyče
$B^{(m)}$		matice deformace
C	[N/mm ²]	koeficient monotónního zpevnění
d	[mm]	průměr tažníku
D	[mm]	průměr tažnice
D_0	[mm]	průměr přístřihu
$D^{(m)}$		matice tuhosti materiálu
F	[N]	síla
\vec{F}_B		vektor objemových sil
F_c	[N]	celková síla
F_e	[N]	síla na mezi kluzu
\vec{F}_{EX}		vektor vnějšího silového působení
\vec{F}_L		vektor osamělých (liniových) sil
F_m	[N]	maximální síla
F_p	[N]	přidržovací síla
$F_{p0,2}$	[N]	smluvní síla na mezi kluzu
\vec{F}_S		vektor povrchových sil
F_t	[N]	velikost tažné síly v první operaci
$H^{(m)}$		matice interpolačních (příčnickových) funkcí
K		matice tuhosti
L	[mm]	délka
L_u	[mm]	délka po přetržení tyče
L_0	[mm]	počáteční měřená délka
MKP		metoda konečných prvků
M_P	[N.mm]	ohybový moment při začínající plastické deformaci
M_{MAX}	[N.mm]	ohybový moment při úplné plastické deformaci
M_{MAX_z}	[N.mm]	ohybový moment se zpevněním
n	[-]	exponent deformačního zpevnění
n_s	[-]	střední exponent deformačního zpevnění

p	[MPa]	specifický tlak
r	[-]	součinitel normálová anizotropie
r_s	[-]	střední hodnota součinitele normálové anizotropie
r_{te}	[mm]	zaoblení tažnice
r_{tu}	[mm]	zaoblení tažníku
r_0, r_{45}, r_{90}	[-]	koefficienty normálové anizotropie
R	[MPa]	smluvní napětí, poloměr zaoblení
R_e	[MPa]	mez kluzu
R_{eH}	[MPa]	horní mez kluzu
R_{eL}	[MPa]	dolní mez kluzu
R_m	[MPa]	mez pevnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
S	[mm ²]	okamžitý průřez
S_p	[mm ²]	plocha přidržovače
S_u	[mm ²]	průřez tyče v místě přetržení
S_0	[mm ²]	počáteční průřez
t	[mm]	tloušťka
\vec{U}		vektor nezávislých uzlových posunů
Z	[%]	kontrakce
α	[°]	úhel ohybu
γ	[°]	úhlová odchylka
ε	[-]	poměrné prodloužení
ε_g	[-]	maximální rovnoměrné poměrné prodloužení
ε_L	[-]	poměrná délka Lüdersovy deformace
ε_u	[-]	maximální poměrné trvalé prodloužení
σ	[MPa]	skutečné napětí
σ_{IP}	[MPa]	skutečné napětí v krajních vláknech materiálu
φ	[-]	skutečná deformace
φ_0	[-]	posunutí křivky zpevnění
ΔL	[mm]	prodloužení
ΔL_L	[mm]	Lüdersova deformace
ΔL_u	[mm]	přírůstek původní měřené délky po přetržení
Δr	[-]	součinitel plošné anizotropie
ΔS_u	[-]	rozdíl původního a konečného průřezu tyče

1. ÚVOD

Tváření dnes patří k nejvýznamnějším a nepostradatelným oblastem strojírenského průmyslu a lze se s ním setkat v řadě oborů. Především pak automobilový průmysl dnes patří k nejdynamičtěji se rozvíjejícím odvětvím. Konkurence je zde značná, výrobní závody denně opouští tisíce nových vozidel, a proto se zde uplatňují nové a moderní technologie, postupy. Numerická simulace je jednou z možností, kam se snaha firem o co nejrychlejší dodání kvalitního výrobku na trh při minimálních nákladech na výrobu zaměřila, protože s narůstajícími požadavky členitosti a složitosti lisovaných dílů není již mnohdy možné se správně rozhodnout o vyrobiteľnosti tvářeného dílu.

Díky tomu dnes na trhu existuje celá řada numerických simulačních softwarů, od univerzálních (ADINA, NASTRAN, ANSYS, ABAQUS, MARC...) až po vysoce specializované, kam patří např.: programy firmy ESI group – PAM Stamp 2G, PAM Form, PAM QuikStamp, PAM DieMaker/Viking. Tyto programy pracují s nejrozšířenějším principem numerické simulace a to s metodou konečných prvků (MKP).

Práce se simulačním softwarem ovšem vyžaduje vysoké nároky na znalosti a zkušenosti obsluhy, jenom tak může vzniknout kvalitní a přínosný výsledek.

V této předkládané práci jsou porovnávány dva simulační programy. První, na plošné tváření specializovaný program PAM Stamp 2G, s jehož provozem je na Katedře strojírenské technologie již dlouholetá zkušenost a druhý, univerzální program MSC.MARC/MENTAT, který umožňuje simulovat širokou škálu úloh tváření, elektromagnetizmu, termomechaniky, akustiky, chování zemin, proudění tekutin atp. Tento program provozuje Katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti a na zvolených simulacích procesů tváření (ohýbání, tažení) zde nebyl dosud použit.

Diplomová práce vznikla v rámci řešení projektu studentské grantové soutěže 2822.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. TVÁŘENÍ KOVŮ [1], [2]

Tvářením kovů rozumíme technologický (výrobní) proces, při kterém dochází k plastickým deformacím, které jsou umožněny plastickými vlastnostmi kovů a slitin bez odběru třísek. Podstatou tváření je vyvolat stav napjatosti překračující mez kluzu materiálu, díky kterému vzniká trvalá deformace požadovaného směru a velikosti. Tento děj je provázen fyzikálními změnami projevujícími se strukturálními změnami materiálu, což ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu.

2.1.1. Rozdělení tvářecích procesů podle působení vnějších sil [1]

- tváření objemové, při kterém deformace nastává ve směru všech tří os souřadného systému a patří sem válcování, kování, protlačování, tažení drátů.
- tváření plošné, při kterém převládají deformace ve dvou směrech. Patří sem tažení, ohýbání, stříhání, apod.

2.2. TEORIE OHÝBÁNÍ [1], [2], [5]

Ohýbání je proces tváření, při kterém je materiál pružně plasticky deformován momenty vnějších sil do různého úhlu ohybu se zaoblením hran. Nástrojem je ohýbadlo skládající se z ohybníku a ohybnice. Výrobkem je výlisek nebo také ohybek. Ohnutí tělesa, jehož vzniklé tvary jsou nazpět rozvinutelné, využívá stejných zákonů plasticity, jako ostatní způsoby tváření, tj. překročením meze kluzu dosáhneme oblasti plastické deformace. Plastická deformace je doprovázena deformací elastickou, která má na svědomý nežádoucí efekt odpružení. Ohýbání zasahuje poměrně malý objem polotovaru, v němž napětí a deformace silně mění velikost i směr po průřezu od povrchu materiálu k neutrální ose.

Na velikost deformace při ohýbání mají vliv kvalita materiálu a jeho tloušťka, orientace ohybu vzhledem ke směru válcování, poloměr ohybu a velikost ohybových momentů.

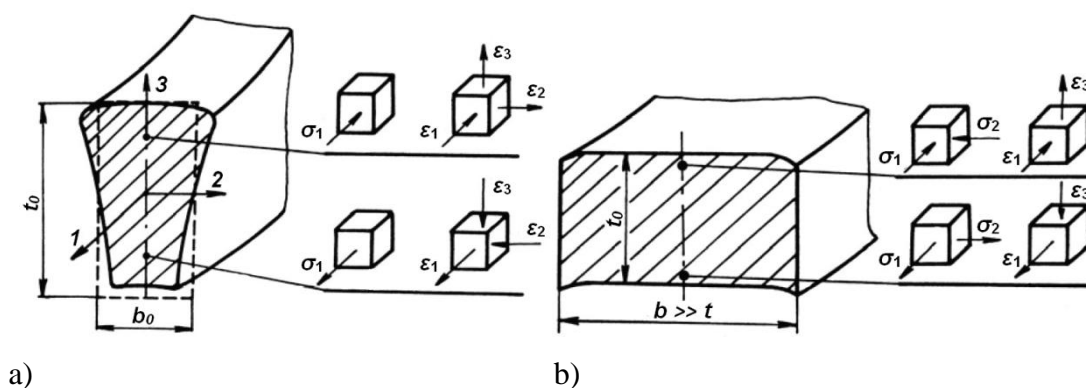
Ohýbání můžeme rozdělit podle teploty na ohýbání za tepla nebo za studena.

Dále se bude práce zabývat pouze ohýbání za studena.

2.2.1. Napjatost a přetvoření při prostém ohybu [3]

Z hlediska napjatosti a přetvoření se dělí ohýbání plechu do dvou skupin dané vzájemným poměrem šířky polotovaru b a tloušťky polotovaru t . Tyče úzké jsou přitom více deformovány než široké plechy a pásy.

- Ohýbání tyčí úzkých $b < t$ - šířka je menší než výška a napětí σ_2 ve směru šířky lze zanedbat, protože materiál není schopen vyvodit odpovídající odpor. Na vnitřní tlakové oblasti se šířka tyče zvětšuje a naopak na vnější tahové straně se zase zmenšuje. (Obr. 2.1a)
- Ohýbání širokých plechů a pásů $b \gg t$ - vzniká napětí σ_2 z důvodu velké šířky polotovaru, a proto nedochází v příčném směru ε_2 k deformaci materiálu. (Obr. 2.1b)



Obr. 2.1: Napjatost a deformace průřezu při ohybu a) úzkých tyčí, b) širokých pásů [3]

2.2.2. Neutrální osa [1], [3]

Vrstvy kovu na vnitřní straně ohybu jsou namáhána tlakem a vrstvy kovu na vnější straně ohybu zase tlakem. Největší tlaková a tahová napětí jsou na okrajích průřezu, směrem k neutrální ose postupně klesají. V přechodu mezi těmito dvěma pásmy jsou vlákna bez napětí a bez deformace. Tyto vlákna tvoří tzv. neutrální osu (Obr. 2.2) a při ohýbání se ani neprodlouží ani nezkrátí. Neutrální osa je na začátku uprostřed průřezu, při ohybu se posouvá směrem k vnitřní straně ohybu. Není tedy

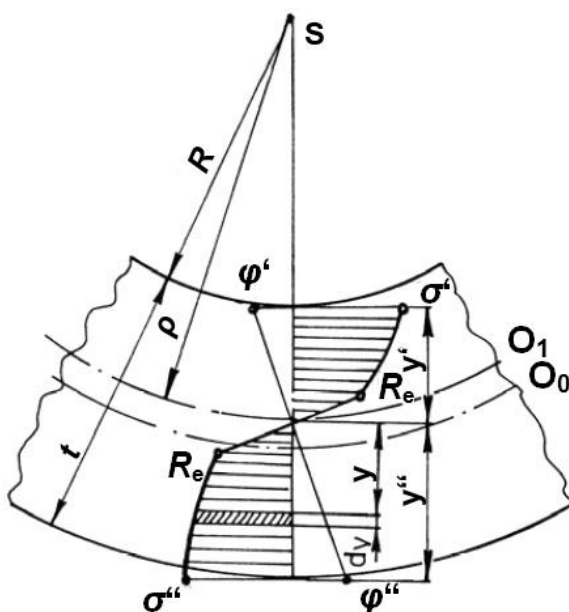
totožná s osou těžiště ohýbaného materiálu. Ve skutečnosti má neutrální osa tvar paraboly, je však nahrazována kruhovým obloukem.

U tenkých plechů a velkých poloměrů zaoblení $R/t > 12$ se předpokládá, že neutrální vrstva leží přibližně uprostřed tloušťky plechu. Při ohýbání s malým poloměrem zaoblení $R/t < 6$ ale dochází ke zmenšení tloušťky v místě ohybu a neutrální vrstva se posouvá k vnitřní straně o vzdálenost x , která charakterizuje polohu neutrální osy a závisí na poměru R/t (Tab. 2.1). Poloměr neutrální osy ρ se potom vypočítá:

$$\rho = R + t \cdot x \quad [\text{mm}] \quad 2.2.2.1$$

Tab. 2.1: hodnoty součinitele x [1]

R/t	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1	1,5	2	3	5
x	0,23	0,29	0,32	0,35	0,37	0,39	0,41	0,44	0,45	0,46	0,50



Obr. 2.2: Posunutí neutrální osy O_1 v ohybku [3]

2.2.3. Výpočet ohybového momentu

V této kapitole bude uveden stručný výčet vzorců pro ohýbání úzkých tyčí a širokých pásů jak bez, tak i se zpevněním.

2.2.3.1. Ohýbání bez zpevnění [3], [5]

a) Ohýbání úzkých tyčí

Úsečka OP (Obr. 2.3) zobrazuje oblast pružné deformace a bod P přechod do oblasti plastické deformace. Ohybový moment při začínající plastické deformaci M_P (2.2.3.1a) pro úzké tyče bez zpevnění se vypočte:

$$M_P = R_e \cdot \frac{b \cdot t^2}{6} \quad [\text{N.mm}] \quad (2.2.3.1a)$$

Pokud se plastická deformace rozšíří na celou tloušťku tyče, pak je ohybový moment při úplné plastické deformaci M_{MAX} :

$$M_{MAX} = R_e \cdot \frac{b \cdot t^2}{4} \quad [\text{N.mm}] \quad (2.2.3.1b)$$

b) Ohýbání širokých pásů

V příčném směru při ohýbání širokých pásů k deformaci průřezu téměř nedochází. Hodnoty momentů M_P a M_{MAX} se pouze zvětší o hodnotu 2/3 oproti ohybovým momentům u úzkých tyčí. Platí tedy:

$$M'_P = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot R_e \cdot \frac{b \cdot t^2}{6} \quad [\text{N.mm}] \quad (2.2.3.1c)$$

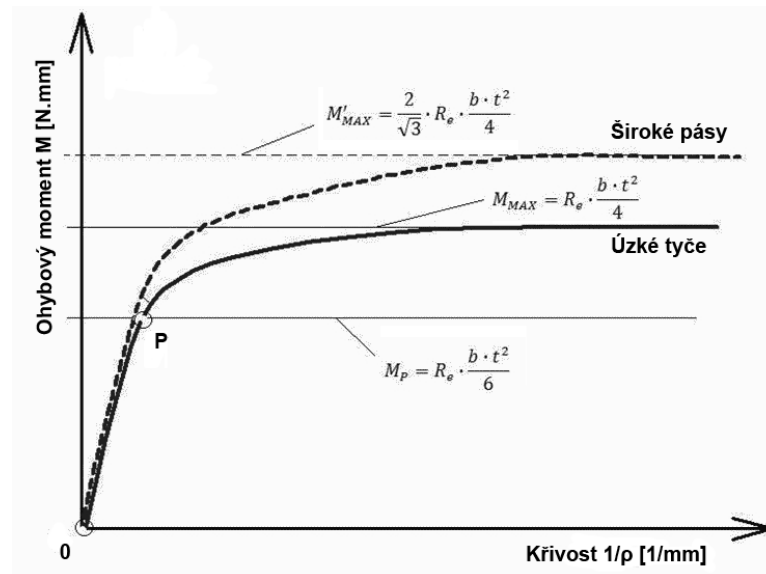
$$M'_{MAX} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot R_e \cdot \frac{b \cdot t^2}{4} \quad [\text{N.mm}] \quad (2.2.3.1d)$$

kde je:

R_e ... mez kluzu [MPa]

b ... šířka polotovaru [mm]

t ... tloušťka polotovaru [mm]



Obr. 2.3: Závislost ohybového momentu v průřezu ohybku [5]

2.2.3.1. Ohýbání se zpevněním [3], [5]

Ve skutečnosti při ohýbání tyčí a pásů dochází v důsledku plastického přetvoření ke zpevnění, a proto se zvětšuje i napětí σ_I . Největší zpevnění a přetvoření je v krajních vláknech materiálu. Šrafovaná oblast (Obr.: 2.4a) poté znázorňuje přírůstek napětí způsobeného zpevněním. Po vyčerpání zásoby plasticity dojde k porušení celistvosti a pak platí, že $\sigma_{IPMAX} < R_m$. Se vzrůstajícím napětím roste i ohybový moment, černá oblast (Obr. 2.4b) pak vyjadřuje přírůstek ohybového momentu. Platí tedy:

$$M_{MAX_Z} = \sigma_{IP} \cdot \frac{b \cdot t^2}{4} \quad [\text{N.mm}] \quad (2.2.3.2a)$$

$$M'_{MAX_Z} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{IP} \cdot \frac{b \cdot t^2}{4} \quad [\text{N.mm}] \quad (2.2.3.2b)$$

kde je:

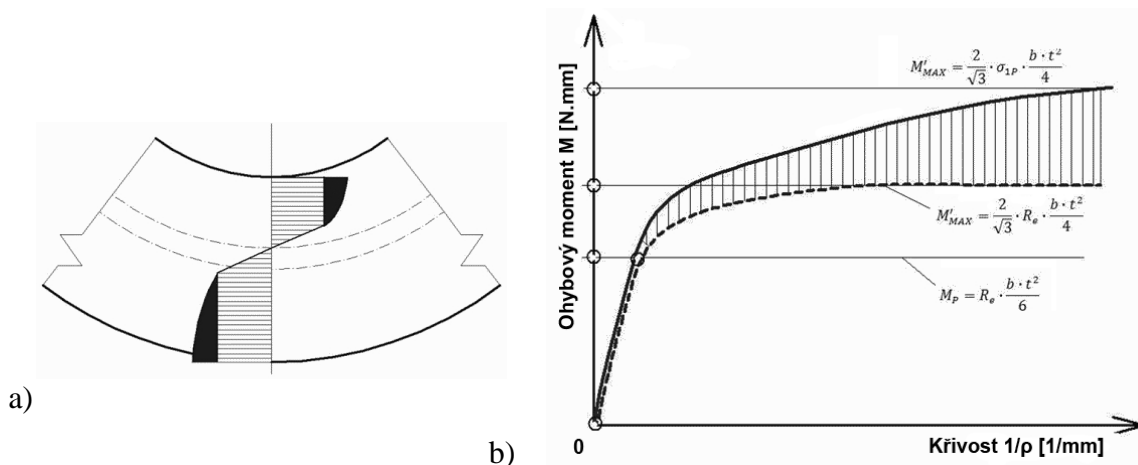
M_{MAX_Z} ... ohybový moment pro úzké tyče se zpevněním

M'_{MAX_Z} ... ohybový moment pro široké tyče se zpevněním

σ_{IP} ... napětí v krajních vláknech materiálu [MPa]

b ... šířka polotovaru [mm]

t ... tloušťka polotovaru [mm]

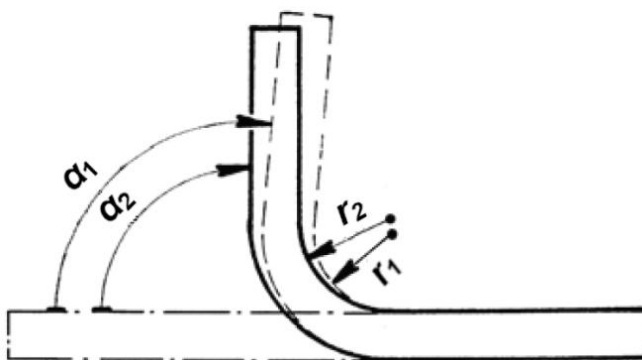


Obr. 2.4: a) vliv zpevnění (černě) na rozložení napětí, b) změna velikosti ohybového momentu vlivem zpevnění tyče. [5]

2.2.4. Odpružení při ohybu [1]

Výsledný tvar ohnuté součásti po odpružení nesouhlasí s tvarem ohýbadla. Při ohybu se tato nežádoucí dodatečná deformace projevuje jako úhlová odchylka $\alpha_1 - \alpha_2 = \gamma$ (Obr. 2.5), jejíž význam roste s délkou ramen. Zpětné odpružení je způsobeno pružnou deformací materiálu kolem neutrální osy. Velikost úhlů odpružení je závislá na mechanických vlastnostech materiálu, poloměru ohybu a konstrukce ohýbadla. Pro běžné materiály bývá míra odpružení v rozsahu 3 až 15°. Lze ho omezovat základními metodami, jejichž postupy jsou následující:

- úhel ohybu se zvětší o hodnotu úhlu odpružení γ , který se určí podle empirických vzorců nebo tabulek. Pro dosažení požadovaného tvaru výlisku se musí nástroj navrhnout s korekcí o úhel γ
- použije se kalibrace, tj. zvětší se lisovací síla na konci lisovacího cyklu
- použije se prolisův na výlisku, které odpružení odstraní téměř úplně



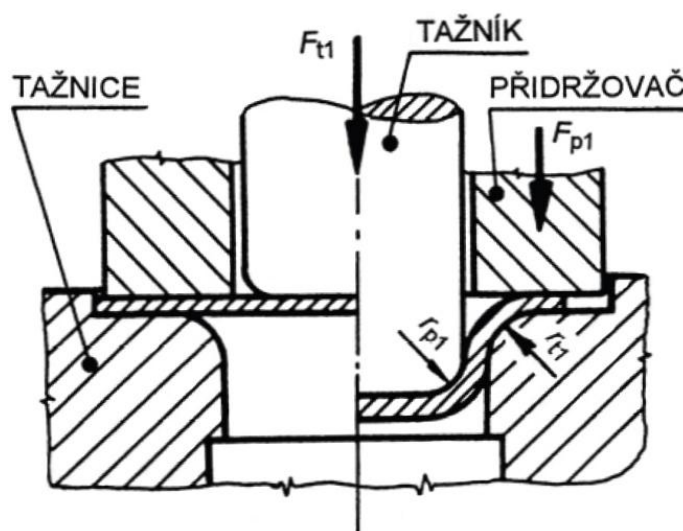
Obr. 2.5: Odpružení při ohýbání [4]

2.3. TEORIE TAŽENÍ [1], [5]

Tažení je proces tváření, při kterém je materiál z plechů či pásů přetvořen v duté těleso. Jedná se o prostorový ohyb do nerozvinutelných tvarů buď v jedné nebo více tažných operacích bez podstatného zeslabení tloušťky stěny nebo zesílení. Nástrojem je tažidlo skládající se z tažníku a tažnice, výrobkem je výtažek. Aby se výtažek v tažnici nevlínil, používá se při procesu tváření přidržovač.

Z hlediska základních způsobů tažení se dělí tažení plechů a pásů do tří skupin:

- Tažení bez zeslabení stěny bez nebo s přidržovačem v jedné i více operacích (Obr. 2.6)
- Tažení se zeslabením stěny
- Další způsoby tažení (zúžování, rozšiřování lemování atd.)

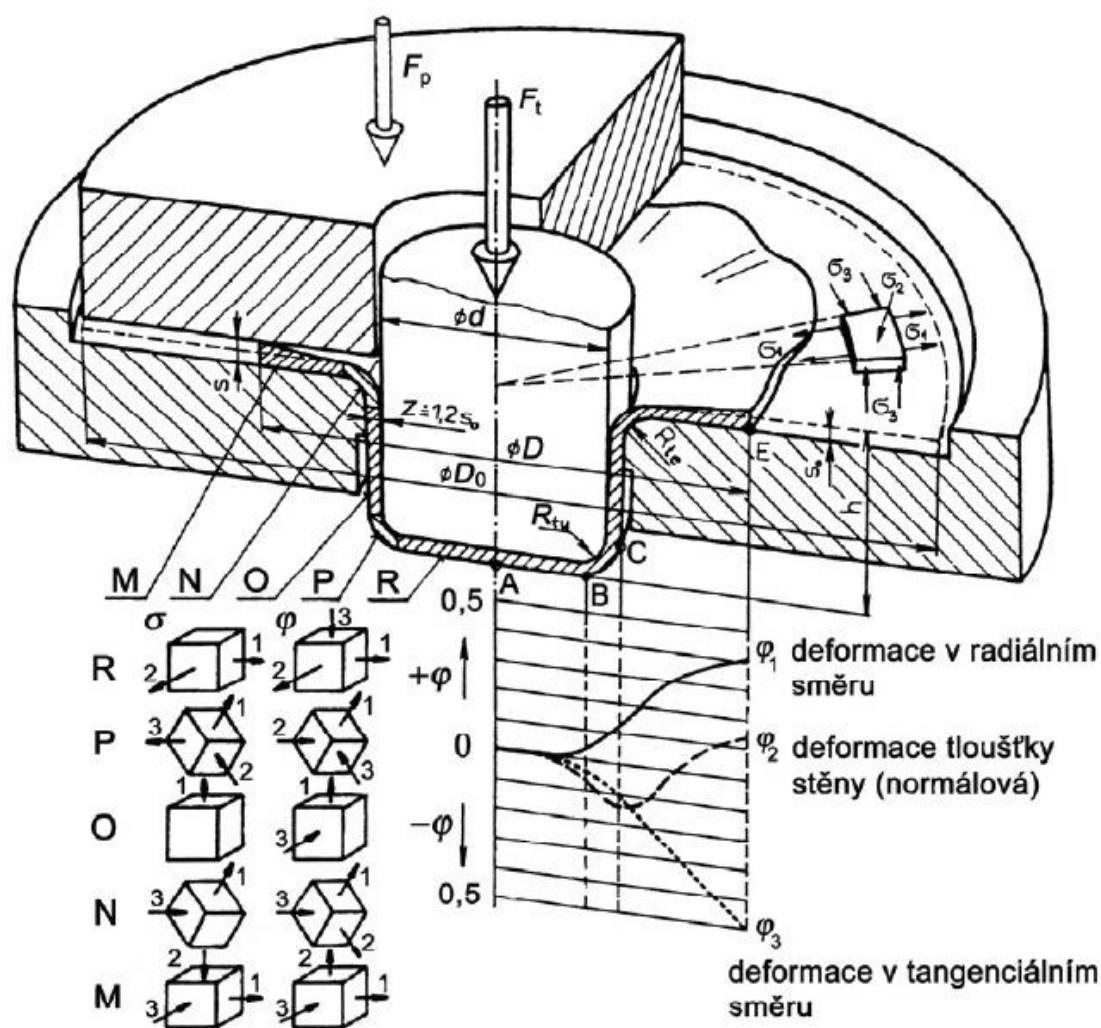


Obr. 2.6: Tažení bez zeslabení stěny s přidržovačem [4]

2.3.1. Napjatost a deformace při tažení bez zeslabení stěny s přidržovačem [1]

Při tažení výtažku dochází k anizotropii mechanických vlastností plechu a napjatost se v různých místech liší. Výtažek lze při tažení rozdělit do několika oblastí (Obr. 2.7). Oblast vnější příruby M je namáhána tahem v radiálním směru, tlakem v tangenciálním směru a normálovým tlakem na povrch výtažku. Oblast prostorového stavu napjatosti a přetvoření N je namáhána největším radiálním

ohybem a nejmenším tangenciálním tlakem. V oblasti O vzniká pouze jednoosý stav napjatosti. V oblasti prostorového stavu napjatosti a přetvoření N u dna výtažku vzniká největší tahové napětí, jehož důsledkem je i zeslabování tloušťky stěny a to vede k nebezpečí utržení dna. V poslední oblasti M na dně výtažku vzniká rovinný stav napjatosti s prostorovým stavem přetvoření.



Obr. 2.7: Napjatost a deformace při jednooperačním tažení válcového výtažku bez ztenčení stěny [3]

2.3.2. Výpočet tažné síly [5]

Výpočet síly pro proces tažení je komplikovaný. Při výpočtu se vychází ze základní rovnice rozložení radiálních a tečných napětí z podmínky rovnováhy a podmínky plasticity, která je doplněná o vliv tření od přidržovače a vliv ohybu na tažné hraně.

Velikost celkové tažné síly při použití přidržovače F_T musí být o něco menší, než síla způsobující utržení dna výtažku od bočních stěn:

$$F_T = \pi \cdot d_s \cdot t_0 \cdot \sigma_{z\max} \quad [\text{N}] \quad 2.3.2.1$$

kde je:

$\sigma_{z\max}$... membránové napětí dle Sachse či Šlofmana [MPa]

d_s ... střední průměr polotovaru $d_s = d + t_0$ [mm]

d ... průměr tažníku [mm]

t_0 ... počáteční tloušťka polotovaru [mm]

Z důvodu zaměření a rozsahu práce je zde uveden pouze základní vztah. Více informací o dané problematice se nachází v literatuře [5].

2.4. STATICKÉ ZKOUŠKY KRÁTKODOBÉ [7], [9]

Statickými zkouškami se hodnotí chování materiálu za působení stálých nebo pomalu a spojitě se měnících sil. Podle druhu namáhání se jedná o zkoušku tahem, tlakem, smykem a ohybem a zkoušky tvrdostí. Z nich nejpoužívanější jsou statická zkouška tahem a zkoušky tvrdosti.

2.4.1 Statická zkouška tahem za normálních teplot [7], [9]

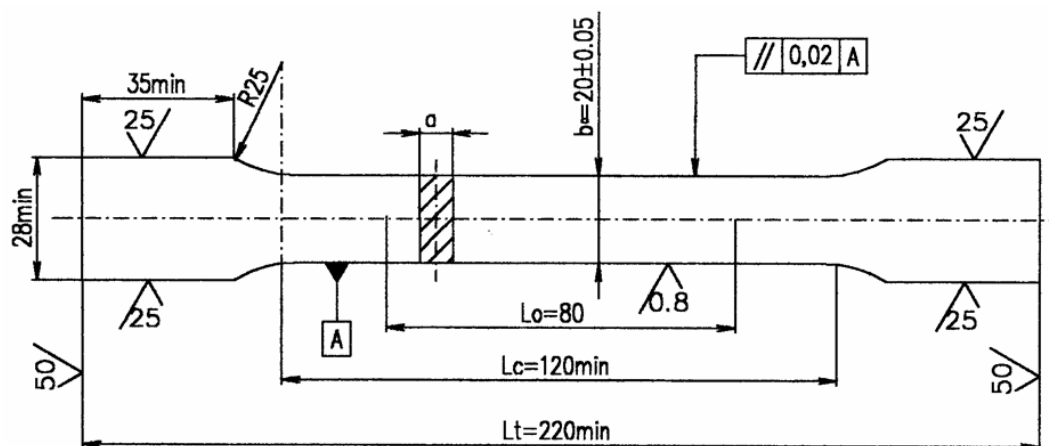
Statická zkouška tahem (ČSN EN ISO 6892-1) spočívá v deformaci zkušební tyče postupně se zvyšujícím tahovým zatížením předepsanou rychlostí, obvykle až do lomu. Účelem je stanovení napětí při daných deformacích.

Zkouška se provádí za okolní teploty mezi 10 až 35°C, ale podle požadavku i za teplot vyšších nebo nižších.

2.4.1.1. Průřezy a rozměry zkušebních tyčí [7], [9]

Normalizované zkušební tyče mají kruhový, obdélníkový, čtvercový nebo víceúhelníkový průřez. Vnitřní část tyče je určena k měření a konce tyčí mající zvětšený průřez slouží k upnutí.

Na zkušební tyči (Obr. 2.8) je měřicí oblast ohraničena počáteční měřenou délkou L_0 , na níž se zjišťují všechny potřebné hodnoty nutné pro výpočet mechanických parametrů zkoušeného materiálu.



Obr. 2.8: Zkušební tyč obdélníkového profilu $L_0=80$ mm [7]

2.4.1.2. Pracovní diagram [7], [9]

Tahová síla F vyvozená zkušebním strojem se postupně zvyšuje a vyvolává prodloužení zkušební tyče včetně její měřené části z původní délky L_0 na okamžitou délku $L = L_0 + \Delta L$. Tato závislost prodloužení na velikosti vyvozené síly se vynáší do grafické podoby a vzniká dle normy tzv. pracovní diagram. Současně se podle zákona o konstantním objemu zmenšuje původní průřez S_0 na okamžitý S .

Tvary diagramů kovových materiálů se dělí na dva základní typy:

- 1) Pracovní diagram s výraznou mezí kluzu - představitel je diagram neuklidněné nízkouhlíkové vyžíhané oceli (Obr. 2.9a).
- 2) Pracovní diagram s nevýraznou mezí kluzu s plynule stoupající křivkou - představitel je diagram vyžíhané ukladněné oceli (Obr. 2.9b).

2.4.1.3. Vyhodnocení pracovního diagramu [7], [9]

Jelikož pracovní diagram síla-prodloužení ($F-\Delta L$) neumožňuje porovnání jednotlivých materiálů, přepočítávají se síly i prodloužení na napětí a relativní prodloužení.

Ve zkušební tyči vzniká při zatěžování tahové napětí $\sigma = F/S$ [MPa] označované jako skutečné napětí. V diagramu $\sigma-\varphi$ se tento vztah znázorňuje stále se

zvyšující křivka dosahující v okamžiku lomu tyče maxima.

Protože by činilo zjišťování snižujícího se průřezu tyče S během zatěžování velké potíže, zvláště pak u nekrhových tyčí, kde se nezmenšuje jen tloušťka a šířka, ale mění se i tvar průřezu tyče, používají se tzv. smluvní napětí označované písmenem R (2.4.1.3a):

$$R = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.4.1.3a)$$

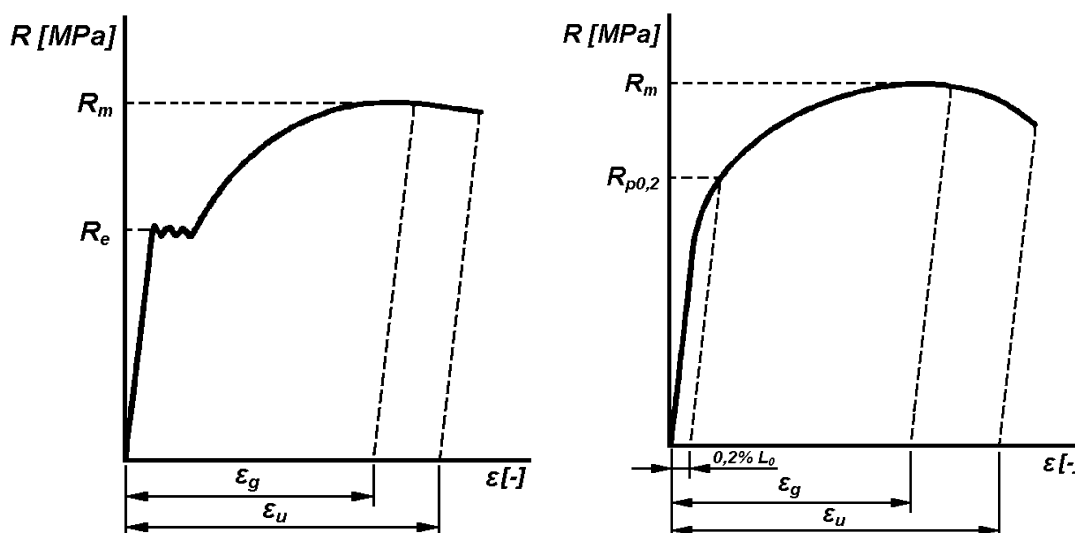
kde je:

F ... zatěžující síla [N]

S_0 ... plocha původního průřezu tyče [mm^2]

Pro vyjádření deformace se používá poměrné prodloužení ε (2.4.1.3b):

$$\varepsilon = \frac{L}{L_0} \quad [-] \quad (2.4.1.3b)$$



Obr. 2.9: Smluvní diagram a) s výraznou mezí kluzu, b) s nevýraznou mezí kluzu [7]

2.4.1.4. Výpočet základních normalizovaných parametrů [7], [9]**a) Mez kluzu**

Mez kluzu R_e je smluvní napětí, které se vypočte jako poměr příslušné síly F [N] na mezi kluzu k ploše původního průřezu S_0 [mm²].

Výrazná mez kluzu R_e (2.4.1.4a):

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.4.1.4a)$$

U ní se ještě někdy rozlišuje horní mez kluzu R_{eH} (2.4.1.4b) a dolní mez kluzu R_{eL} (2.4.1.4c):

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.4.1.4b)$$

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.4.1.4c)$$

Nevýrazná mez kluzu:

Nevýrazná mez kluzu $R_{p0,2}$ (2.4.1.4d) se určuje ze síly odpovídající trvalé absolutní deformaci $\Delta L = 0,2\% L_0$:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.4.1.4d)$$

b) Mez pevnosti

Mez pevnosti R_m (2.4.1.4e) je smluvní napětí, které se vypočte jako poměr maximální síly F_m [N] k ploše původního průřezu zkušební tyče S_0 [mm²].

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.4.1.4e)$$

c) Tažnost

Tažnost (2.4.1.4f) A_{xmm} označuje procentuální maximální poměrné trvalé prodloužení ε_u .

$$A_{xmm} = 100 \cdot \varepsilon_u = 100 \cdot \frac{\Delta L_u}{L_0} \quad [\%] \quad (2.4.1.4f)$$

kde je:

L_0 ... původní měřená délka tyče [mm]

L_u ... délka po přetržení původního měřeného úseku [mm]

$\Delta L_u = (L_u - L_0)$... přírůstek původní měřené délky po přetržení [mm]

d) Kontrakce (zúžení)

Kontrakce Z (2.4.1.4g) je poměr průřezu přetržené zkušební tyče k jejímu původnímu průřezu v procentech.

$$Z = 100 \cdot \frac{\Delta S_u}{S_0} \quad [\%] \quad (2.4.1.4g)$$

kde je:

S_u ... průřez tyče v místě přetržení [mm²]

S_0 ... původní průřez tyče [mm²]

$\Delta S_u = S_0 - S_u$... rozdíl původního a konečného průřezu tyče [mm²]

U tyčí jiných než kruhových průřezů se kontrakce určuje výjimečně z důvodů obtížnosti zjišťování zúženého průřezu.

2.4.1.5. Výpočet skutečného napětí a deformace [8]

Smluvní napětí R [MPa] a poměrné prodloužení ε [-] je možné použít v případě malých deformací, kdy změny průřezu zkušební tělesa jsou malé. V ostatních případech je třeba použít skutečné napětí $\sigma = F/S$ (2.4.1.5a) a skutečnou (logaritmickou) deformaci $\varphi = \ln(L/L_0)$ (2.4.1.5b).

$$\sigma = R \cdot (1 + \varepsilon) \quad [\text{MPa}] \quad (2.4.1.5a)$$

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad [-] \quad (2.4.1.5b)$$

2.4.1.6. Anizotropie mechanických vlastností [7], [9]

Anizotropie **Chyba! Zálůžka není definována.** plechů a pásů je myšlena směrová nestejnoměrnost jejich mechanických a fyzikálních vlastností.

Základní příčinou vzniku anizotropie je strukturní a krystalografická textura. Důsledkem válcování a tepelného zpracování je textura, která se všeobecně definuje jako geometrické a krystalografické uspořádání struktury a substruktury polykrystalického kovu.

Anizotropie se rozlišuje plošná a normálová.

a) Normálová anizotropie [7], [9]

Normálová anizotropie (Obr. 2.10) je dána součinitelem normálové anizotropie r (2.4.1.6a) a vyjadřuje odlišnost mechanických vlastností a tím i deformací zjištěných v rovině pásu nebo plechu a v rovině k ní kolmé. Součinitel je definován jako podíl skutečného zmenšení šířky φ_b [-] ke skutečnému zmenšení tloušťky φ_a [-] zkušební tyče v oblasti rovnoměrné deformace. Protože je měření délky tyče přesnější než měření její tloušťky, nahradí se na základě platnosti zákona o konstantním objemu deformovaného tělesa poměr a_0/a poměrem $L \cdot b / L_0 \cdot b_0$.

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_a} = \frac{\ln \frac{b_0}{b}}{\ln \frac{a_0}{a}} = \frac{\ln \frac{b_0}{b}}{\ln \frac{L \cdot b}{L_0 \cdot b_0}} \quad [-] \quad (2.4.1.6a)$$

kde je:

$a_0, b_0 \dots$ počáteční tloušťka a šířka tyče [mm]

$a, b \dots$ konečná tloušťka a šířka tyče [mm]

$L_0, L \dots$ počáteční a konečná hodnota měřené části délky tyče [mm]

Čím vyšší je hodnota r , tím více plech odolává místnímu ztenčení tloušťky.

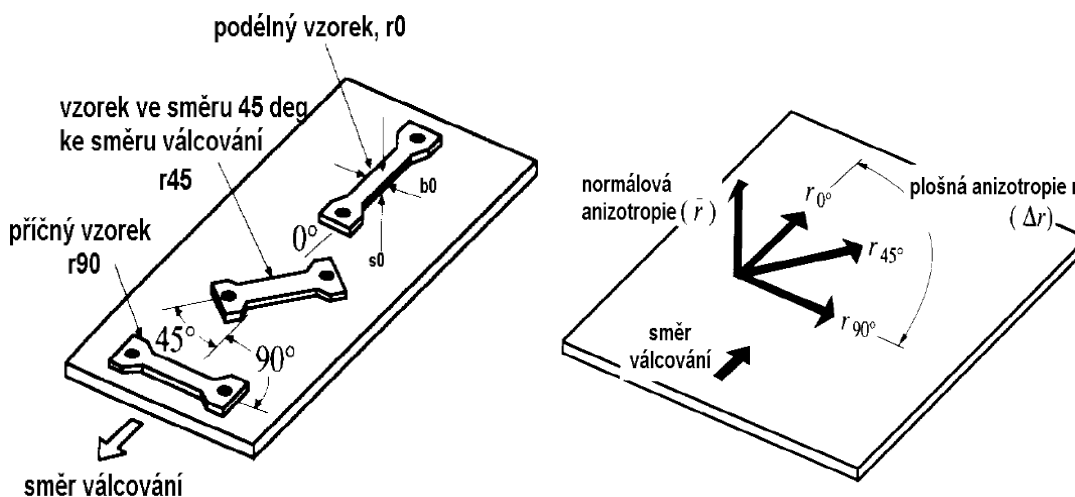
Střední hodnota součinitele normálové anizotropie (2.4.1.6b) je pak dána aritmetickým průměrem součinitelů normálové anizotropie ze směrů 0° , 45° , 90° k ose válcování.

$$r_s = 0,25 \cdot (r_0 + r_{90} + 2 \cdot r_{45}) \quad [-] \quad (2.6.1.6b)$$

b) Plošná anizotropie [7], [9]

Plošná anizotropie (Obr. 2.10) se hodnotí součinitelem plošné anizotropie Δr a vyjadřuje rozdílnost mechanických vlastností v rovině pásu nebo plechu zjištěných v různých směrech vzhledem ke směru válcování. Součinitel se vypočítává z hodnot koeficientů normálové anizotropie r_0 , r_{45} a r_{90} (2.6.1.6c).

$$\Delta r = 0,5 \cdot (r_0 + r_{90} - 2 \cdot r_{45}) \quad [-] \quad (2.6.1.6c)$$



Obr. 2.10: Znázornění normálové a plošné anizotropie [9]

2.4.1.7. Deformační zpevnění [7], [9], [10]

Exponent deformačního zpevnění n vyjadřuje míru schopnosti daného materiálu se při své plastické deformaci zastudena zpevňovat (2.4.1.7a, 2.4.1.7b).

Podle Swifta je definován jako exponent parabolické rovnice vyjadřující závislost mezi skutečným napětím σ a skutečnou deformací φ [-].

$$\sigma = C.\varphi^n \quad [\text{MPa}] \quad (2.4.1.7a)$$

Dle Swifta – Krupkowského je do vztahu zahrnuto i posunutí křivky zpevnění φ_0 [-] z důvodu lepší aproximace pro oblast pružných deformací.

$$\sigma = C.(\varphi_0 + \varphi)^n \quad [\text{MPa}] \quad (2.4.1.7b)$$

kde je:

C ... koeficient monotónního zpevnění [N/mm^2]

Čím je hodnota exponentu deformačního zpevnění větší, tím materiál lépe odolává nerovnoměrné deformaci při tahovém namáhání.

Hodnota exponentu deformačního zpevnění tak jako koeficientu normálové anizotropie se mění se směrem odebrání vzorku vzhledem k ose válcování, a proto je nutné k jeho označení tento směr zaznamenat. Střední exponent deformačního zpevnění n_s (2.4.1.7c) je aritmetickým průměrem exponentů deformačního zpevnění ze směrů 0° , 45° , 90° k ose válcování.

$$n_s = 0,25.(n_0 + n_{90} - 2.n_{45}) \quad [-] \quad (2.4.1.7c)$$

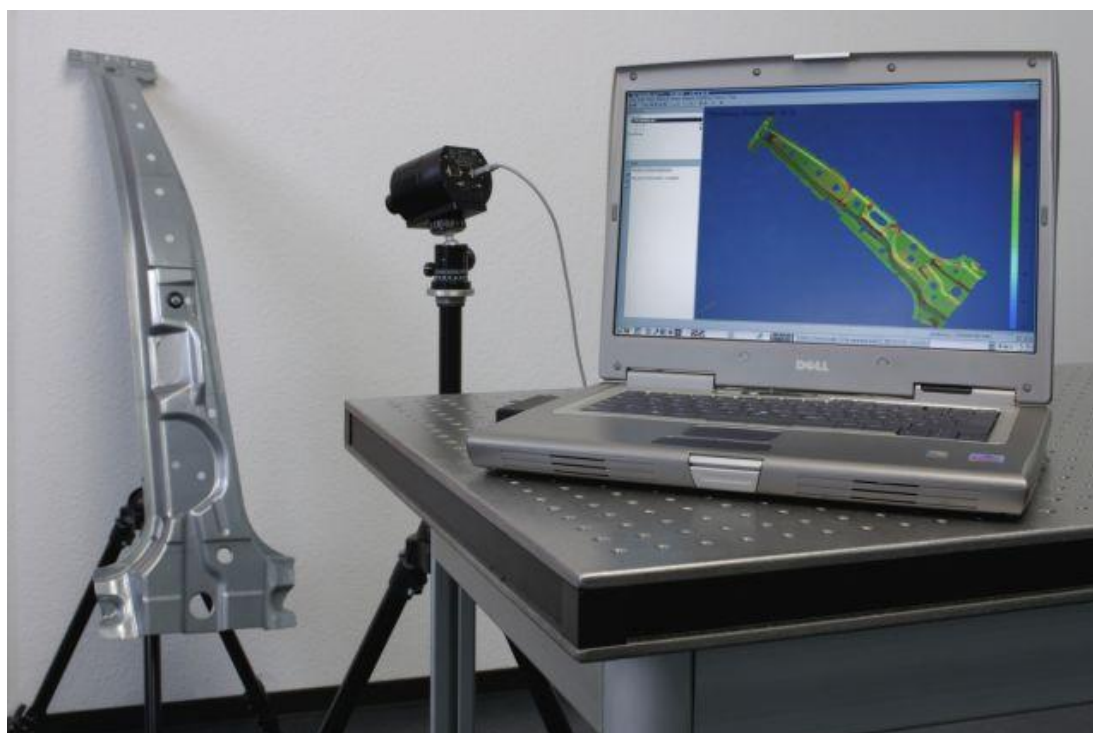
2.5. FOTOGRAMMETRIE [3]

Fotogrammetrie se nazývá všeobecná metoda, s jejíž pomocí lze získat z jednoho či více snímků informace o tvaru a poloze objektu, který zachycen na snímku nepřímou metodou. Patří sem rekonstrukce tvarů, měření rozměrů či určování polohy předmětů zobrazených na fotografických snímcích. Fotogrametrii je tedy možné uplatnit v zásadě všude tam, kde lze požadovaný objekt vyfotografovat a následně vyhodnotit, to znamená i při procesu tváření. Tyto principy využívají také optické měřicí přístroje pro měření deformace plechů firmy

GOM GmbH, ARGUS (2.5.1) a ARAMIS (2.5.2), které byly použity v experimentální části práce.

2.5.1. Optický měřicí systém ARGUS [11]

ARGUS (Obr. 2.11) je bezkontaktní optický 3D měřicí systém pro měření a analýzu deformací plechových součástí po procesu tváření. Tento měřicí systém se využívá především tam, kde není možnost sledovat proces tváření po celou dobu průběhu. Při měření se analyzuje pouze počáteční a koncový stav.



Obr. 2.11: Optický měřicí systém ARGUS [11]

Jeho přednosti jsou ve velkém rozsahu měření (díly od 100mm do několika m), rozsahu měření deformace (od 0.5% až do několika stovek %), vysoké přesnosti, a také v mobilitě, díky čemuž lze celý systém převážet v osobním automobilu.

Princip měření spočívá v elektrochemicky vyleptané mřížce bodů, která se deformuje zároveň s tvářeným dílem. Po vylisování je plechový díl z různých směrů několikrát naskenován jen jednou kamerou s CCD čipem. Takto načtené snímky jsou pomocí integrovaného systému ARGUS převedeny do trojrozměrných souřadnic bodů mřížky a na základě laterální distorze tj. měření deformované deformační sítě a

metody zachování konstantního objemu je vypočteno rozložení deformace, posuvu, zúžení či FLC diagram. Výsledek výpočtu je poté barevná mapa v trojrozměrném modelu i s možností vytváření řezů.

2.5.2. Optický měřicí systém ARAMIS [11]

ARAMIS (Obr. 2.12) je bezkontaktní měřicí systém firmy GOM pro měření reálných 3D deformací. Výsledkem je barevná mapa rozložení deformací na objektu zatěžovaném buď staticky, nebo i dynamicky. Proces měření může být spouštěn v pravidelných časových intervalech (např. s prodlevou 1s) nebo může být řízen externím signálem (např. ze zatěžovacího stroje). Maximální rychlost snímkování může být až 4000 snímků za sekundu u systému HS. Při měření rotačních objektů se dá propojit více systémů ARAMIS do jednoho měřicího systému.



Obr. 2.12: Optický měřicí systém ARAMIS [12]

Jeho přednosti jsou podobné jako u optického měřicího systému ARGUS. Tímto systémem lze ovšem měřit rozsah dílu od 1mm až po 1000mm a díky sprejem jednoduše připraveným povrchem změřit vysokou hustotu naměřených dat (body na povrchu).

Princip měření spočívá v nanesení kontrastního vzoru (patternu) a následném zatěžování dílu i s tímto vzorem. Při zatěžování dílu je každá úroveň zatížení (stage) sejmuta 2 kamerami s CCD čipem a takto načtené obrazy zpracovány a převedeny integrovaným systémem ARAMIS, podobně jako u systému ARGUS, do trojrozměrných souřadnic bodů patternu. Výsledkem výpočtu je poté trojrozměrná barevná mapa v každé úrovni zatížení dílu. Tímto systémem lze určit hodnoty posunutí, deformace, tvar objektu v jednotlivých úrovních zatížení, dále hodnoty změny tloušťky u plechů a velikost deformace vůči limitní tvářecí křivce (FLC).

Díky spojitému snímání celého procesu tváření umožňuje systém ARAMIS měření v širokém spektru použití od zkoušek materiálů, testování nových materiálů, zjišťování materiálových vlastností, přes výpočty stability a zkoumání materiálů v nelineárních oblastech deformace, až po charakteristiky procesu tečení a stárnutí.

2.6. NUMERICKÁ SIMULACE TVÁŘECÍCH PROCESŮ [13]

Numerickou simulací tvářecích procesů je myšlena aplikace metody konečných prvků (MKP) na řešení problematiky tváření s využitím odpovídajících rychlostních, posuvových a kontaktních okrajových i počátečních podmínek. Simulace tváření spojuje geometrickou a materiálovou nelinearitu, přičemž okrajové podmínky řešení jsou časově proměnné. Z toho pak vyplývá velká náročnost na výpočetní čas a s tím související hardwarové prostředky.

Spojení výpočetní techniky s numerickými softwary pracujícími s přesným popisem fyzikálních dějů v materiálu polotovaru a způsobu tváření přináší do vývoje dílů a přípravy výroby potřebné prvky přesnosti a rychlosti při minimálních nákladech na výrobu. Simulace poskytuje již v předvýrobní etapě cenné informace o chování tvářeného materiálu. Zejména možnost ověření správnosti návrhu tvářecího nářadí v prostředí virtuálního prototypu (na obrazovce počítače) ještě před fyzickou výrobou nářadí je velmi ceněná, protože každá další potřebná úprava se pak provádí pouze na CAD/CAE modelu, což přináší vysoké úspory výrobních nákladů.

Při využívání numerické simulace však musí být bráno v úvahu, že metoda konečných prvků je jen jednou z metod přibližné analýzy a výsledek simulace je tak přesný, jak přesný je popis skutečnosti tj.: vhodná volba modelů chování materiálu, diskretizace, popisu zatěžování, specifikace okrajových podmínek, algoritmu vlastního řešení atd.

V současné době existuje velké množství programů na bázi aplikace metody konečných prvků. V předkládané práci jsou pro simulace procesů tváření využívány dva programy, PAM Stamp 2G a MSC.MARC/MENTAT.

2.6.1. Základy metody konečných prvků [14]

Metoda konečných prvků (MKP) je založena na deformaci a posuvu čtyřúhelníkových či trojúhelníkových elementů, tvořící simulované těleso. Na hranách elementů se pak nacházejí tzv. uzly, což jsou body nesoucí informace velikosti posuvu, které se aplikují na celý deformovaný element. Vznikají soustavy rovnic s mnoha konstantami, které plynou z okrajových a počátečních podmínek. Základní vztah v MKP je tzv. rovnice rovnováhy MKP, vycházející z celkové potenciální energie a která má tvar:

$$K \cdot \vec{U} = \vec{F}_{EX} \Rightarrow \vec{U} = \vec{F}_{EX} \cdot K^{-1} \quad 2.6.1.1$$

kde je:

K ... matice tuhosti všech elementů (tělesa)

\vec{U} ... vektor nezávislých uzlových posunů

\vec{F}_{EX} ... vektor vnějšího silového působení

Matice tuhosti je odvozována ve tvaru:

$$K = \sum_m \int_{V^{(m)}} B^{(m)T} \cdot D^{(m)} \cdot B^{(m)} \cdot dV^{(m)} \quad 2.6.1.2$$

kde je:

$B^{(m)}$... matice deformace m-tého elementu

$D^{(m)}$... matice tuhosti materiálu

Vektor vnějšího silového působení je dán součtem působících sil:

$$\vec{F}_{EX} = \vec{F}_B + \vec{F}_S + \vec{F}_L \quad 2.6.1.3$$

kde je:

\vec{F}_B ... vektor objemových sil

\vec{F}_S ... vektor povrchových sil

\vec{F}_L ... vektor osamělých (liniových) sil

V němž je:

$$\vec{F}_B = \sum_m \int_{V^{(m)}} \vec{F}_B^{(m)T} \cdot H^{(m)} \cdot dV^{(m)} \quad 2.6.1.4$$

$$\vec{F}_S = \sum_m \int_{S^{(m)}} \vec{F}_S^{(m)T} \cdot \Delta H^{(m)} \cdot dS^{(m)} \quad 2.6.1.5$$

$$\vec{F}_L = \sum_m \vec{F}_L^{(m)T} \cdot \Delta H^{(m)} \quad 2.6.1.6$$

kde je:

$\vec{F}_B^{(m)}, \vec{F}_S^{(m)}, \vec{F}_L^{(m)}$... vektory sil m-tého elementu

$H^{(m)}$... matice interpolačních (příčnickových) funkcí

Vyjádření poměrných deformací

$\varepsilon^T = (\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx})$ se získá ze vztahu:

$$\varepsilon = B \cdot \vec{U} \quad 2.6.1.7$$

Vyjádření napětí

$\sigma = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx})^T$ se získá ze vztahu:

$$\sigma = D \cdot (\varepsilon - \varepsilon_0) - \sigma_0 \quad 2.6.1.8$$

kde je:

ε_0, σ_0 ... počáteční hodnoty poměrné deformace a napětí

2.6.2. PAM Stamp 2G [15], [16]

Programový modul PAM Stamp 2G (Obr. 2.13) je specializovaný CAE software pro simulaci plošného tváření technologiemi hlubokého tažení, ohýbání, lisování do pryže (flexformingu), hydroformingu plechů i trubek, atd. Využívá v externím kreslicím softwaru vytvořený CAD model nástrojů a polotovaru, který je poté automatickým generátorem převeden ve výpočtovou síť CAE modelu. Výpočtová deformační síť polotovaru je tvořena přímo v grafickém prostředí preprocesoru spolu s potřebnými počátečními, okrajovými, kontaktními i zatěžujícími podmínkami. Software plně akceptuje polotovar s nelineární deformační historií. Popis materiálového chování je založen na Hillově formulaci podmínky plasticity (Hill 1948), která uvažuje i směrově závislou anizotropií, vznikající při válcování. Pro tváření hliníku je pak možné v programu využít nekadratickou podmínku plasticity (Hill 1990). Deformační zpevňování materiálu může být doplněno i citlivostí na deformační rychlost.

V důsledku znalosti deformační historie umožňuje PAM Stamp 2G zahrnout do výpočtu kritéria porušování soudržnosti materiálu plechu v průběhu tažení (lokální překročení hraniční plastické deformace, ztenčení, překročení křivky mezních deformací) s přímou vizualizací zvlnění přístřihu plechu v průběhu zavírání přidržovače a tažení. Výpočtová simulace tažení umožňuje do výpočtu zahrnout i deformaci vlastní tíhou přístřihu. Pokud je polotovar tažen ve více operacích, tak se výsledky z prvního tahu přenášejí do následující operace, kde se tak zohlední ztenčení plechu i deformačně napěťový stav výlisku na počátku druhého tahu. Po tažení obvykle následuje ostřížení a po něm simulace odpružení. Pro svou obecnou formulaci tak lze program PAM Stamp 2G použít pro výpočty simulací libovolné výrobní technologie plošného tváření.

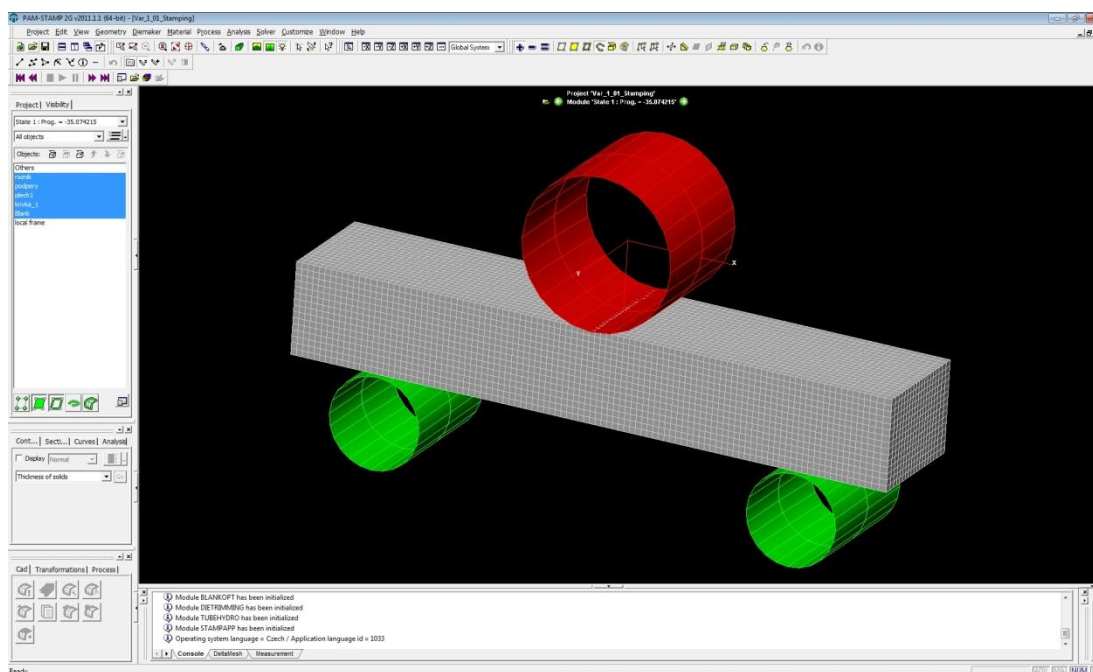
K simulaci procesu tváření je nutné mít určité znalosti a data. Následující seznam obsahuje všechny informace, které jsou nutné k simulaci procesu tváření:

- 1) Soubor obsahující CAD data povrchu nástrojů
- 2) Soubor obsahující CAD data přístřihu plechu (v určitých případech není nutný, síť nástřihu plechu ve tvaru čtverce, kruhu a kruhové úseče je možné vytvořit přímo v preprocesingu)
- 3) Orientace nástrojů vůči směru tváření
- 4) Kinematika tvářecího procesu (pohyb a vzájemná pozice nástrojů při tváření)

- 5) Přítlačná síla přidržovače / přidržovací tlak
- 6) Součinitel tření mezi nástroji a polotovarem
- 7) Materiálové charakteristiky polotovaru:

- Měrná hmotnost
- Youngův modul pružnosti E
- Tloušťka polotovaru s
- Poissonova konstanta μ
- Mez kluzu R_e
- Křivka zpevnění
- Součinitel normálové anizotropie r
- Směr válcování – podle způsobu popisu anizotropie
- Křivka mezního přetvoření daného materiálu

Pro vlastní simulaci je potřeba vytvořit geometrii složitějších nástrojů jako např. tažnice v některém z CAD programových souborů a pro přenos do prostředí PAM Stamp 2G použít data ve formátu IGES, VDA či CV-CADDS. Ostatní nástroje a nástřih plechu je možné vytvořit v preprocesoru programu PAM Stamp 2G.

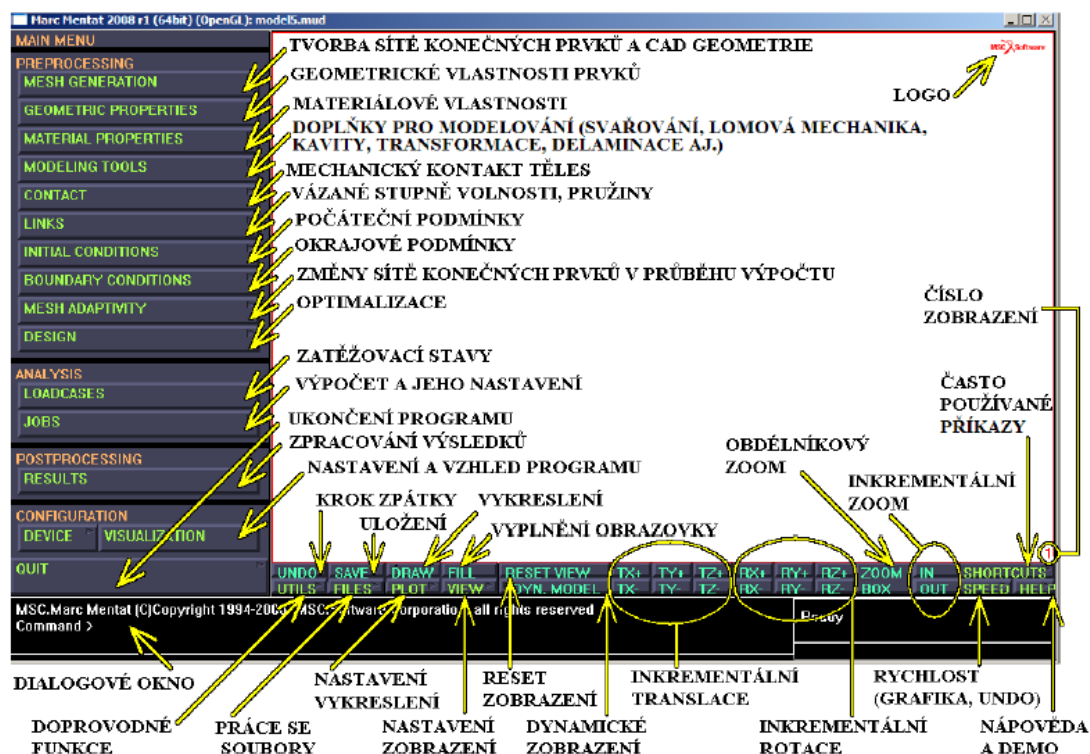


Obr. 2.13: Uživatelské prostředí programu Pam Stamp 2G

2.6.3. MSC.MARC/MENTAT [17]

Program MSC.MARC/MENTAT (Obr. 2.14) slouží k numerickému řešení úloh v oblastech fyziky a používá deformační variantu MKP. Výrobce produktu je firma MSC.Software, která je poskytovatelem mnoha dalších softwarů, např. MSC.Nastran, MSC.Adams, MSC.Dytran atd.

Tímto programem je možno řešit široké spektrum úloh statiky, kinematiky, dynamiky, pružnosti a pevnosti, tváření, úloh mechanického kontaktu těles, creepu, lomové mechaniky, únavy materiálu, popisu chování zemin a hornin, termomechaniky, přenosových jevů, dále také problémy akustiky, proudění tekutin, elektromagnetismu atp. Lze také uvažovat různé typy materiálů (kovy, kompozitní materiály, plasty, pěny, pryže, skla, zeminy aj.). Tento program vyniká především kvalitou řešení nelineárních úloh. Velikou předností jsou také možnost použití adaptivní změny sítě, zatížení a okrajových podmínek v průběhu řešení ("Adaptive Meshing", "Adaptive Loading", "Rezoning" a "Remeshing") při řešení komplikovaných úloh zahrnující velké přetvoření polotovaru. Program MSC.MARC (řešič) má vlastní pre & postprocesor MSC.MENTAT, který není přímo součástí řešiče MSC.MARC. Z toho vyplývá, že k použití programu MARC není potřeba program MENTAT. Jako další plně zaměnitelná a kompatibilní alternativa pre & postprocesoru může být použitý také systém MSC.MARC/PATRAN. Program MSC.MARC využívá speciální paralelizace, tj. výpočet simulace je možné provádět pomocí metody doménové dekompozice (rozdělení deformované výpočetní sítě na několik částí) na více procesorech. Velmi výhodné je také to, že si uživatel může navíc vytvořit tzv. uživatelské procedury ("User's Subroutines") v jazyce FORTRAN, kterými lze zavést nové typy elementů, zatížení, okrajových a počátečních podmínek, nové algoritmy kontaktu těles, vytvořit vlastní numerickou metodu řešení, definovat vlastní nové chování materiálu atp. Další přednost softwaru MSC.MARC/MENTAT je také tvorba dalších rozšíření v běžném programovacím jazyce Python. Samozřejmostí je možnost načítat soubory z jiných preprocesorů, nebo MKP programů.



Obr. 2.14: Uživatelské prostředí programu MSC.MARC/MENTAT [17]

Program MSC.MARC/MENTAT potřebuje mít k simulaci procesu tváření podobné znalosti a data jako program PAM Stamp 2G. Jelikož se však jedná o univerzálnější software, jeho vlastní pre & postprocesor MSC.MENTAT obsahuje rozvinutější CAD funkce, díky nimž je možné nakreslit i poměrně složité tvary nástrojů či polotovarů přímo v programu. Další odlišností jsou materiálové charakteristiky polotovaru, které jsou závislé na typu použité formulaci podmínky plasticity. Z nabídky lze zvolit několik druhů těchto podmínek jako např.: Mises (pro simulaci tváření vyžaduje i pouze mez kluzu), Hill, Barlat, Mohr-Colomb, Buyukozturk a další.

MSC.MARC je odborníky považován již téměř 40. let za světovou špičku v oblasti řešení nelineárních úloh, především v oblasti popisu materiálového chování, úloh velkých deformací (např. tváření, elastomery) a mechanického kontaktu těles.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1. CÍL EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Hlavním cílem experimentální části diplomové práce bylo porovnat přesnost výpočtů tvářecích procesů dvou konkurenčních konečnoprvkových simulačních softwarů, PAM Stamp 2G a MSC.MARC/MENTAT a to jak plošných, které reprezentuje proces tažení kruhového přístřihu, tak objemových, jehož reprezentantem je proces ohýbání tlusté obdélníkové tyče. Kritériem přesnosti simulace tvářecí operace byly zvoleny hodnoty hlavních deformací φ , jejichž skutečné hodnoty byly naměřeny na skutečných zkušebních vzorcích pomocí optických měřících systémů firmy GOM GmbH, ARGUS a ARAMIS.

Měření skutečných hodnot deformace φ probíhalo:

- Pro operaci ohýbání pomocí trhacího stroje TIRAtest 2300 a optického systému ARAMIS v laboratořích katedry Strojírenské technologie
- Pro operaci tažení pomocí mechanického lisu LU160 v dílnách katedry Strojírenské technologie a měření deformace optickým systémem ARGUS v prostorách firmy ŠKODA-AUTO, a.s.

Simulace probíhaly:

- V softwaru PAM Stamp 2G v prostorách katedry Strojírenské technologie
- V softwaru MSC.MARC/MENTAT v prostorách katedry Mechaniky, pružnosti a pevnosti

3.2. MĚŘENÍ SKUTEČNÝCH HODNOT DEFORMACE φ POMOCÍ OPTICKÝCH MĚŘÍCÍCH SYSTÉMŮ

3.2.1. Měření procesu ohýbání pomocí optického měřícího systému ARAMIS

Měření ohýbání probíhalo na 3 vzorcích ocelové tyče obdélníkového průřezu tloušťky $t=5$ mm, $t=10$ mm a $t=15$ mm, šířky $b=20$ mm z oceli S235JR+M (viz. PŘÍLOHA 1) dle EN10025, na trhacím stroji TIRAtest 2300 (Obr. 3.2.1.1).

Rychlost příčnicku zkušebního stoje byla $25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, dráha $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ po dobu jedné minuty.

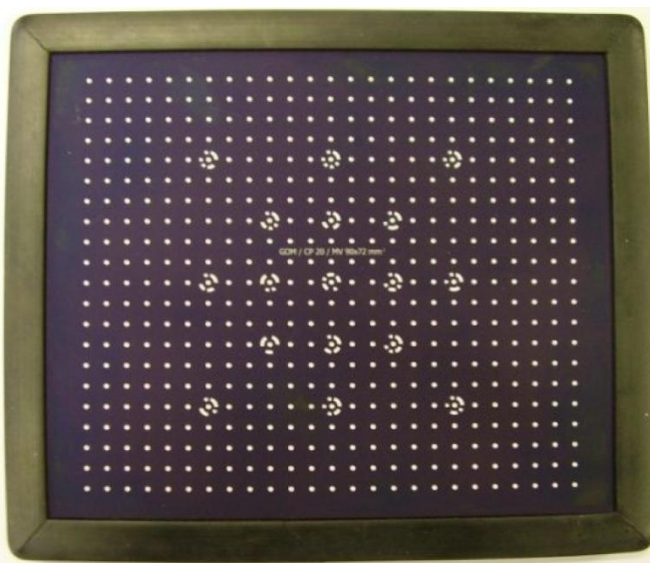
Prvním krokem byla příprava optického měřicího systému skládající se z dvojice kamer s CCD čipem, jenž byly upevněny na nastavitelném stativu z hliníkového profilu proti snímané oblasti (Obr. 3.1). Uprostřed mezi kamerami byl uchycen zdroj laserového paprsku, který usnadňoval přesné natavení vzdálenosti kamer vůči snímané oblasti. Tato oblast byla nastavena v řídicím softwaru systému. Celý systém musel být z důvodu přesnosti měření před snímáním vyrovnan v obou vodorovných osách.



Obr. 3.1: Dvojice kamer s CCD čipem snímající vzorek na trhacím stroji TIRAtest 2300

V dalším kroku následovala kalibrace pomocí kalibrační destičky (Obr. 3.2). Software měřicího systému si poté sám určoval, jak má obsluha kalibrační destičku umístit a natáčet. V každé požadované poloze byla tato destička sejmuta a v softwaru vyhodnocena viditelnost pomocných bodů na ní vyobrazených. Úspěšnost kalibrace

byla potvrzena, pokud v každé poloze byly na snímku viditelné všechny tyto pomocné body.



Obr 3.2: Kalibrační destička

Následující krok se skládal z přípravy vzorků pro samotnou zkoušku. Povrch vzorku byl nejprve ofrézován, poté odmaštěn acetonem a na snímanou oblast sprejem nanesen tenký film bílé akrylátové barvy. Na tuto barvu byla poté sprejem nanесena barva černá tak, že vznikl na povrchu vzorku stochastický vzor neboli pattern (Obr. 3.3). Vzorek musel být poté co nejdříve použit, jinak by se mohlo stát, že by po přílišné prodlevě došlo k zaschnutí barvy, jejím následném praskáním při zatěžování vzorku a tím i k znehodnocení celé zkoušky.

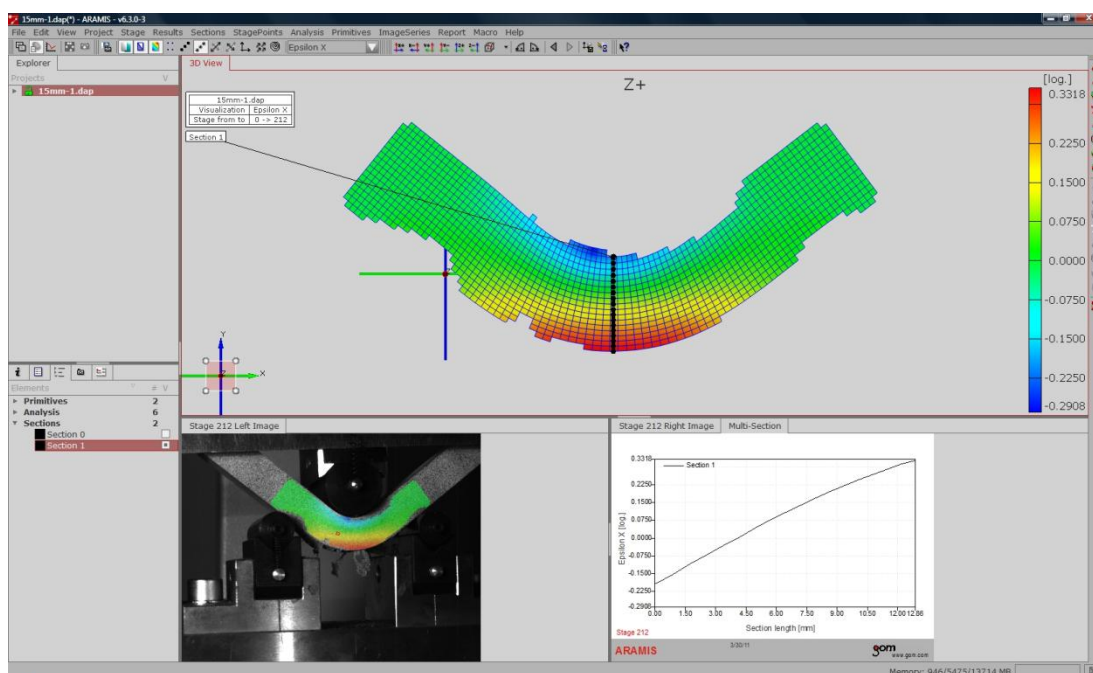


Obr. 3.3: Povrchu vzorku se stochastickým vzorem neboli patternem

Posledním krokem bylo na neoznačeném vzorku určení přibližného času trvání zkoušky, jelikož má systém ARAMIS omezený počet snímků z jednoho měření. Potřebná délka snímaného časového úseku byla dána nastavitelnou frekvencí kamer měřicího systému. Rychlost snímkování byla nastavena na 4 snímky za sekundu pro všechny vzorky.

Při samotné zkoušce se nejprve provedlo sejmutí prvního snímku pro kontrolu kvality naneseného patternu. Pak už byl systém ARAMIS spuštěn spolu s mechanismem zkušebního stoje.

Po provedení zkoušky byly pořízené snímky přeneseny do počítače a následně zpracovány integrovaným softwarem ARAMIS (Obr. 3.4). Ten pomocí pravé a levé kamery vytvořil reálné, trojrozměrné obrazy všech načtených snímků. Aby bylo vyhodnocení výsledků měření co nejrychlejší, tak se na prvním snímku určila maska, což je ohraničená oblast na které probíhá výpočet deformace. Následně byl určen libovolný bod v této masce, od kterého výpočet probíhal. Výsledkem poté byla barevná mapa (Obr. 3.4) každého nasnímaného snímku, z nichž byl pro tuto práci důležitý pouze snímek poslední. V softwaru bylo nastaveno zobrazení skutečné deformace φ_1 ve směru osy x a z takto zpracovaného snímku byla vygenerována potřebná data a dále zpracována postupem popsáním v kapitole 3.5.3.



Obr 3.4: Integrovaný systém ARAMIS

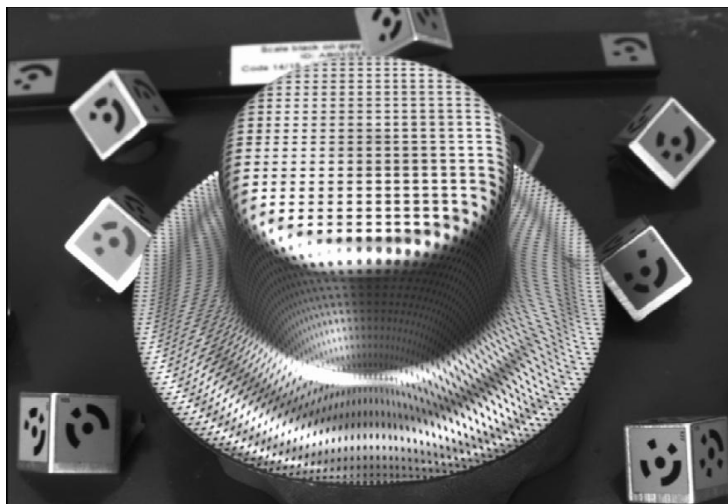
3.2.2. Měření procesu tažení pomocí optického měřicího systému ARGUS

Tvářecí proces tažení neumožňuje jako v případě ohýbání nepřetržité snímání kamerami pomocí optického měřicího systému ARAMIS, navíc by sprejem nanesený pattern jen těžko odolal tření mezi plechem a tažnicí. Z těchto důvodů musel být

použít jiný optický měřicí systém firmy GOM GmbH a to systém ARGUS, kterému stačí pouze sejmutí vzorku po dokončené tvářecí operaci. Tento systém pracuje na principu laterální distorze tj. měření deformované deformační sítě a tato síť musela být před snímáním vytvořena.

Základem pro dobře nanesenou deformační síť je dokonalé odmaštění povrchu vzorku. Na povrchu plechu se nachází z výroby konzervační olej, který se musí spolu s ostatními nečistotami odstranit. K tomu byl použit aceton.

Po odmaštění byla na vzorek nanášena deformační síť s rozměrem 5 mm (vzdálenost středu bodů) elektrolytickým naleptáním (Obr. 3.5). Vzorek se položil na plech tvořící jeden pól a na vzorek bylo položeno síto se vzorem deformační sítě. Na síto byla položena textilie namočená v elektrolytu. Po textilií se poté přejíždělo kovovým válečkem, jenž tvořil druhý pól tak dlouho, dokud se nevytvořila deformační síť. V poslední fázi byl vzorek otřen textilií napuštěnou neutralytem, který odstranil zbytky elektrolytu z povrchu vzorku a navíc vzniklou síť zvýraznil.



Obr. 3.5: Příklad elektrolyticky naleptané sítě připravené k měření systémem ARGUS s kalibračními kameny a značkami [18]

Následně se přístřih z materiálu DC05+ZE 75/75 B P (viz. PŘÍLOHA 2), jehož průměr byl $\varnothing D_0=165,9$ mm a tloušťka $t=0,81$ mm, vložil do nástroje v klikovém lisu LU160 (Obr. 3.6) a rychlostí 300 mm.s^{-1} přetvořen v rotační kelímek. Průměr tažníku $\varnothing d=75,9$ mm a zaoblení $r_{tu}=10$ mm, průměr tažnice $\varnothing D=80$ mm a zaoblení $r_{te}=7$ mm, síla přidržovače $F_p=23,24$ kN.

Takto vytvořený rotační kelímek byl poté vyhodnocen pracovníky ve firmě ŠKODA-AUTO, a.s., kde bylo provedeno měření deformační sítě optickým měřicím systémem ARGUS.



Obr. 3.6: Klikový lis LU160

3.3. ZJIŠTĚNÍ HODNOT DEFORMACE φ POMOCÍ KONEČNOPRVKOVÝCH SIMULAČNÍCH SOFTWARE

Nezbytnost pro simulování jakýchkoli tvářecích procesů je znalost materiálových dat zkoušených materiálů. Tyto data se zjišťují pomocí normalizované tahové zkoušky i dalších zkoušek tváritelnosti. Pro proces tažení bylo potřeba zjistit koeficienty normálové anizotropie r a regresní koeficienty C , n , φ_0 , které byly zjišťovány i pro potřebu simulace procesu ohýbání.

3.3.1. Zjištění koeficientu normálové anizotropie

Koeficient normálové anizotropie r se zjišťuje dle normy ČSN EN 10130 a měří se při deformaci vzorku $\varepsilon=20\%$. Byl zjišťován pro potřebu obou simulačních programů PAM Stamp 2G a MSC.MARC/MENTAT, které anizotropii pro přesnější simulaci vyžadují. Tento koeficient nebyl počítán u obdélníkové tyče S235JR+M, z důvodu nemožnosti odebrání zkušebních vzorků ve směru 45° a 90° .

3.3.1.1. Příprava vzorků

Z tabulí plechu byly na tabulových nůžkách (Obr. 3.7) nastříhány pásy plechů a pomocí výstředníkového lisu LENP 40 (Obr. 3.8) byly z těchto plechů zhotoveny normalizované zkušební tyče obdélníkového profilu s rozměry $0,81 \times 20$ mm délky $L_0=80$ mm dle ČSN EN ISO 6892-1 (Obr. 3.9). Pro každý směr odebrání vzorku byly vyrobeny 3 kusy normalizovaných zkušebních tyčí. Vzorky byly následně orýsovány na orýsovacím zařízení po 10 mm na celé své zkoušené délce a poté vloženy do Abbeho komparátoru (Obr. 3.10), kde byla na desetitisíciny změřena přesná vzdálenost zkušební oblasti tyče. Před samotným zatěžováním tyčí byla v měřicí oblasti každého vzorku zjištěna jeho skutečná šířka na třech místech (začátek, prostředek, konec) pomocí měřicího přípravku.



Obr. 3.7: Tabulové nůžky



Obr. 3.8: Výstředníkový lis
LENP 40



Obr. 3.9: Normalizovaná zkušební tyč



Obr 3.10: Abbeho komparátor

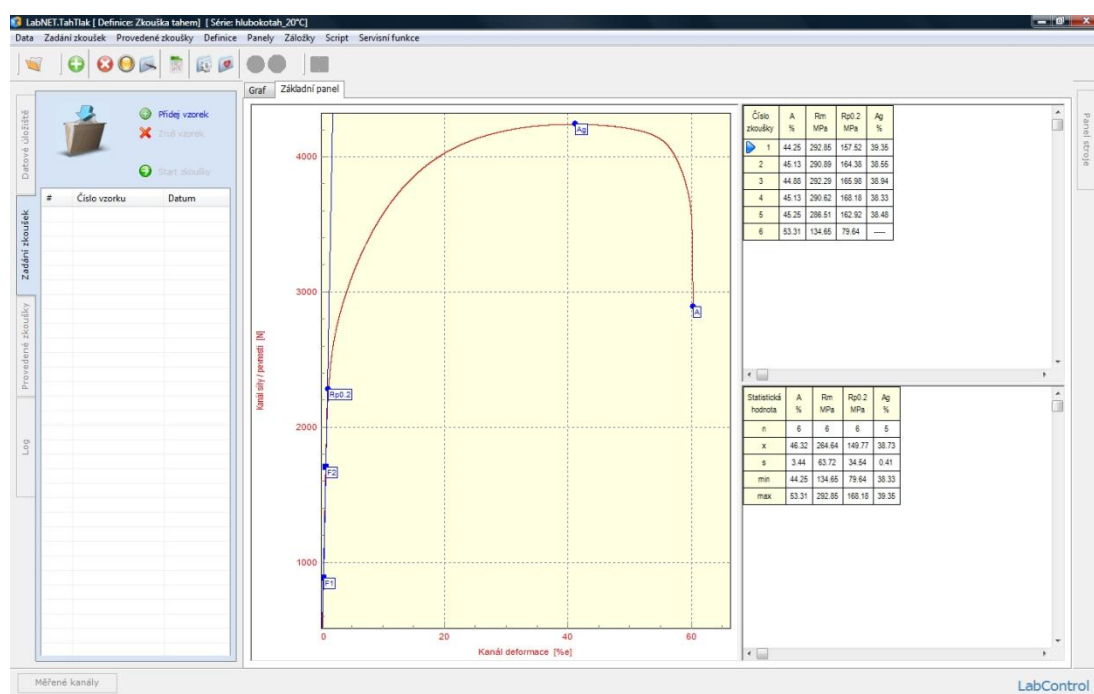
3.3.1.2. Statická zkouška tahem

Statická zkouška tahem se prováděla na trhačím stroji TIRAtest 2300 (Obr. 3.11). Při experimentu byla použita rychlost posuvu čelistí zkušebního stroje $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Vzorky byly vyhodnocovány pomocí software LabNET v.4 (Obr. 3.12) a postup měření se neměnil. Vzorek byl uchycen do čelistí trhačího zařízení a připojen na průtahoměr. Následovalo spuštění programu LabNET v.4, který vyhodnocuje závislost smluvního napětí R na relativní prodloužení zkušební tyče ε . Po normou EN 10130 dosažené předepsané poměrné deformace $\varepsilon=20 \%$ byl trhačí stroj ručně zastaven, vzorek vyjmut a znovu změřeny hodnoty délky L a šířky b . Z těchto naměřených údajů pak byly dopočítány koeficienty normálové anizotropie, dle vztahu 2.5.1.1.



Obr. 3.11: Trhací stroj TIRAtest 2300



Obr. 3.12: LabNET v.4 – grafické rozhraní

Průměrné hodnoty z jednotlivých měření spolu s příslušnými odchylkami jsou uvedeny v Tab. 3.1. Kompletní soubory naměřených a vypočítaných dat lze nalézt v příloze PŘÍLOHA 3.

Tab. 3.1: Průměrné hodnoty a odchylky koeficientu normálové anizotropie

Směr odebrání vzorku	Průměrná hodnota r [-]	Směrodatná odchylka s
0°	1,621	0,016
45°	1,356	0,004
90°	1,982	0,057

3.3.2. Zjištění regresních koeficientů C , n a φ_0

Regresní koeficienty C , n se zjišťují dle normy ČSN ISO 10275 při rozsahu hodnot rovnoměrné plastické deformace od $\varphi=5$ % do maximální hodnoty rovnoměrného přetvoření R_m . Byly zjišťovány pro potřebu simulačního programu PAM Stamp 2G a pro zlepšení přesnosti simulace i pro program MSC.MARC/MENTAT. Také zde platí, že u obdélníkové tyče z materiálu S235JR+M nebylo možno odebrat zkušební vzorky ze směrů 45° a 90°.

3.3.2.1. Příprava vzorků

Vzorky pro určení regresních koeficientů pro plech DC05+ZE 75/75 B P se vyráběly spolu se vzorky na zjištění koeficientu normálové anizotropie. V tomto případě se však tyče nemusely orýsovat ani měřit jejich skutečná šířka b_0 . Pro každý směr byl zhotoven jeden vzorek normalizované zkušební tyče.

Vzorek pro obdélníkovou tyč z materiálu S235JR+M byl vyfrézován do normalizované zkušební tyče obdélníkového profilu s rozměry 5x20 mm délky $L_0=80$ mm dle ČSN EN ISO 6892-1.

3.3.2.2. Statická zkouška tahem

Zkušební vzorky byly zatěžovány až do přetržení a vyhodnocovány softwarem LabNET v.4. Podmínky a postup měření byl shodný s tahovou zkouškou prováděnou pro zjištění koeficientu normálové anizotropie (viz. kap. 3.3.1.).

Získané hodnoty smluvního napětí R a poměrného prodloužení ε byly přepočteny v programu Microsoft Excel na hodnoty skutečného napětí σ , dle vztahu 2.4.1.5a a deformace φ , dle vztahu 2.4.1.5b. Podle ČSN ISO 10275 byly poté tyto hodnoty vyneseny v témže programu do grafu, proloženy mocninou regresí a z rovnice regrese odečteny hodnoty C a n .

Tab. 3.2: Hodnoty C , n a φ_0 pro plech DC05+ZE 75/75 B P

Směr odebírání vzorku	C [MPa]	n [MPa]	φ_0 [-]
0°	493,0	0,228	0,006
45°	497,5	0,217	0,008
90°	479,2	0,212	0,009
Průměr	482,8	0,218	0,008

Tab. 3.3: Hodnoty C , n a φ_0 pro tyč S235JR+M

Směr odebírání vzorku	C [MPa]	n [MPa]	φ_0 [-]
0°	757,6	0,223	0,006

Z důvodu lepší aproximace pro oblast pružných deformací bylo do vztahu zahrnuto i posunutí křivky zpevnění φ_0 . Při výpočtu tohoto posunutí křivky zpevnění se posouvá mez kluzu na svislou osu σ , tedy $\varphi_{p0,2}=0$ při $R_{p0,2}$. Vztah dle Swifta – Krupkowského (2.5.3.2) byl proto upraven do následující podoby:

$$\begin{aligned}\sigma &= C \cdot (\varphi_0 + \varphi)^n \\ \sigma_{p0,2} &= C \cdot (\varphi_0 + \varphi_{p0,2})^n \\ \sigma_{p0,2} &= C \cdot (\varphi_0 + 0)^n \\ R_{p0,2} \cdot (1 + 0,002) &= C \cdot \varphi_0^n \\ \varphi_0 &= \sqrt[n]{\frac{R_{p0,2} \cdot (1 + 0,002)}{C}}\end{aligned}\tag{3.3.2.2a}$$

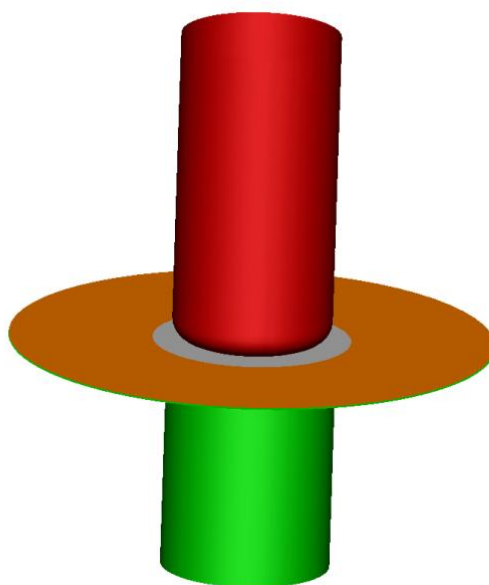
Potřebné hodnoty $R_{p0,2}$ byly odečteny ze smluvních diagramů R - ε . Spočtené hodnoty C , n a φ_0 , z jednotlivých měření včetně průměrných hodnot použitých v simulačních programech jsou uvedeny v Tab. 3.2, 3.3. Kompletní soubory naměřených, odečtených a vypočítaných dat včetně regresních grafů lze nalézt v příloze PŘÍLOHA 4.

3.3.3. Definice procesů ohýbání a tažení v programu PAM Stamp 2G

Při definici procesu ohýbání a tažení se díky specializaci programu postup přípravy simulace lišil jen v menších detailech, proto zde bude postup popsán pro obě operace společně se zdůrazněním odlišností přípravy.

Prvním krokem přípravy bylo vytvoření tvaru polotovaru i nástroje v kreslicím prostředí Autodesk Inventor jako tenké 2D plochy pro potřebu programu PAM Stamp 2G ve formátu *.iges.

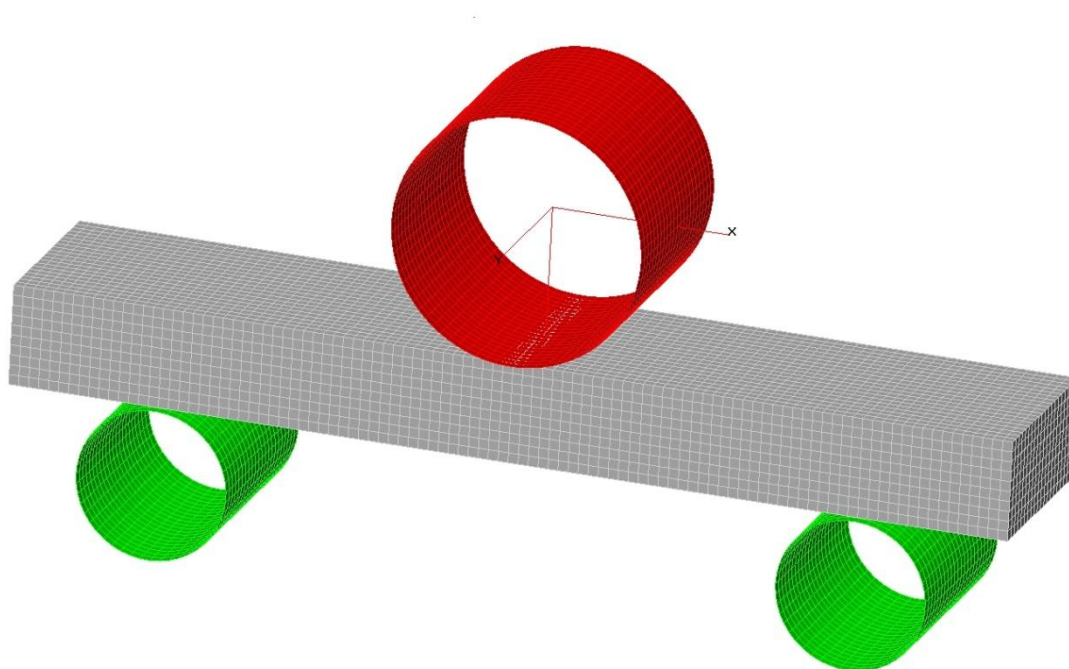
Dalším krokem bylo založení nového projektu a následné načtení polotovaru i všech dílů nástroje (Obr 3.13), jejichž souborový název se zobrazil v menu Project, v levé části okna. Program PAM Stamp 2G si poté podle geometrie sám rozdělil díly nástroje na plošné elementy a všechny tyto elementy uvnitř jednolitých dílů, bylo potřeba pomocí zobrazených šipek vektorů směřovat a případně otočit do tvářeného materiálu.



Obr. 3.13: Model procesu tažení v programu PAM Stamp 2G

V následujícím kroku byla z 2D plochy přístřihu vytvořena kontúra neboli obrys a tato byla následně zasít'ována sítí o takové velikosti, jenž zajišťuje dostatečnou přesnost simulace tváření (Tab. 3.5, Tab. 3.6). Pro tváření plechů lze z výpočtového hlediska považovat plech za skořepinu s danou tloušťkou. Skořepina je plošný prvek, jehož jeden rozměr je podstatně menší, než oba zbývající. Elementy jsou poté tvořeny na střední ploše, tj. v polovině tloušťky plechu. U obdélníkové tyče

byly na vytvoření obdélníkového profilu zadány souřadnice rohových uzlů, protože síť automaticky vytvořená pomocí kontúry není geometricky přesná a potřebné uzly neležely uprostřed ohybku v měřené křivce (Obr. 3.14). Spolu s definicí vlastností sítě byly v programovém okně Blank Editor zadány materiálová data tvářeného materiálu včetně specifikace plošného tváření a jednotlivých tloušťek plechu nebo tyčí. Při samotné definici materiálu se vyplňuje tzv. materiálová karta, která může být vložena do databáze materiálů a v případě potřeby rychle a opakovaně použita. Pro křivku zpevnění byl použit model zpevnění dle Swifta – Krupkovského.



Obr. 3.14: Model procesu ohýbání v programu PAM Stamp 2G

Posledním krokem před vlastní simulací bylo zadání kinematiky pohybu nástroje a definice technologických podmínek. V programovém okně Data Setup Macro byly přiřazeny do připravené šablony tvářecí operace jednotlivé části nástroje i polotovary z nabídky všech importovaných dílů tak, aby je program PAM Stamp 2G od sebe rozeznal. Dále byly v programovém okně Objects Attributes definovány hodnoty tření (Tab. 3.4, Tab. 3.5.), velikosti posuvu, rychlosti, počet ukládaných stavů při vlastním tváření (Tab. 3.4, Tab. 3.5.), v případě tažení síla přidržovače a v případě ohybu odpružení.

Před samotnou simulací byly jednotlivé díly a polotovary napozicovány pomocí vzájemných doteků, tj. byla určena jejich výchozí poloha před simulací tváření.

Vzhledem k omezenému rozsahu práce byl postup přípravy simulace pouze stručně nastíněn a samotné definování procesu se skládá z daleko většího množství bodů a postupů.

Tab. 3.4: Seznam použitých dat pro proces ohýbání

Velikost elementu sítě (VxŠxD)	tloušťka 5 [mm]	tloušťka 10 [mm]	tloušťka 15 [mm]
	0,5x1x1	1x1x1	1x1x1
Počet kroků	tváření		odpružení
	10		2
Koeficient tření f [-]	0,12		

Tab. 3.5: Seznam použitých dat pro proces tažení

Velikost elementu sítě	(Šířka x Šířka) [mm]	
	≈ 1x1 (automatické přizpůsobení velikosti)	
Počet kroků	uzavření formy	tváření
	1	10
Koeficient tření f [-]	0,08	

3.3.4. Definice procesů ohýbání a tažení v programu MSC.MARC/MENTAT

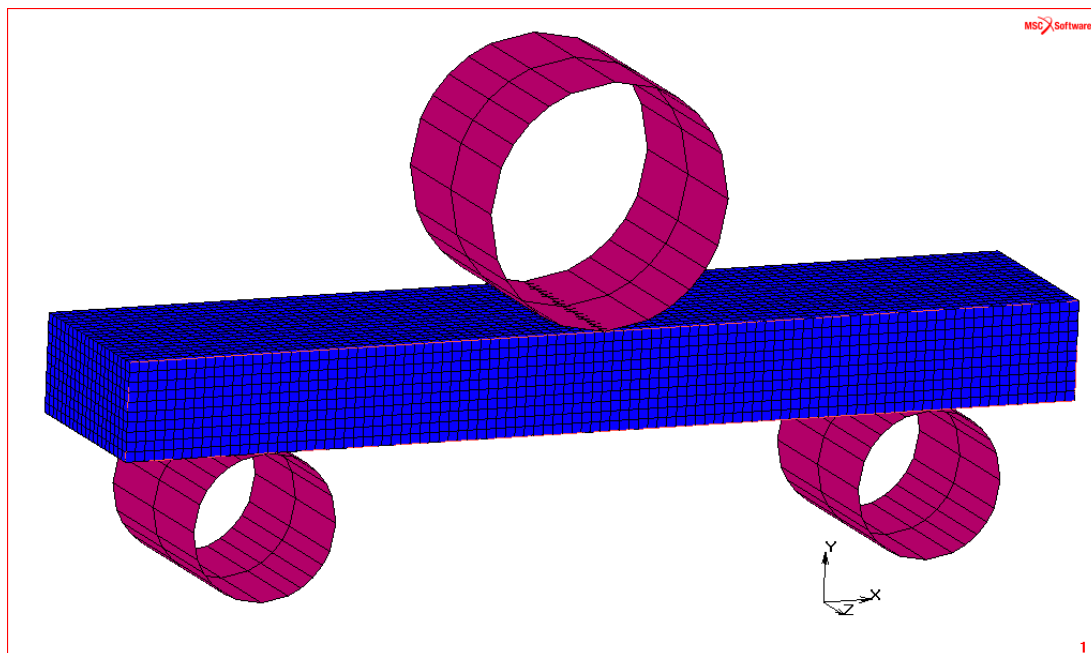
Postup definice obou tvářecích procesů se díky univerzálnosti programu MARC/MENTAT lišil již ve více detailech, proto budou procesy ohýbání a tažení probrány v samostatných kapitolách.

3.3.4.1. Definice procesů ohýbání

Jelikož program MARC/MENTAT obsahuje grafický preprocesor, bylo prvním krokem vytvoření tvaru polotovaru i nástroje přímo v tomto programu. Nástroj byl tvořen podobně jako v programu PAM Stamp 2G pomocí 2D ploch, ohybek jako kontúra z křivek. Tato kontúra byla zasítována a vysunuta do prostoru spolu s určením dostatečné velikosti sítě (Obr. 3.15, Tab. 3.7). Také zde bylo potřeba orientovat elementy nástroje do tvářeného materiálu jako v programu PAM Stamp 2G, tyto směry byly odlišeny pomocí dvou barev žluté a červené, z nichž prvně jmenovaná musela být nasměrována právě do polotovaru.

V dalším kroku byly v sekci Geometric Properties definovány elementy ohybku jako třírozměrné celistvé těleso.

Následujícím krokem byla definice materiálových vlastností v sekci Material Properties a tato definice aplikována na všechny elementy tvořící síť ohybku. Materiálové hodnoty byly shodné jako v programu PAM Stamp 2G včetně křivky zpevnění a podmínky plasticity (Hill 1948).

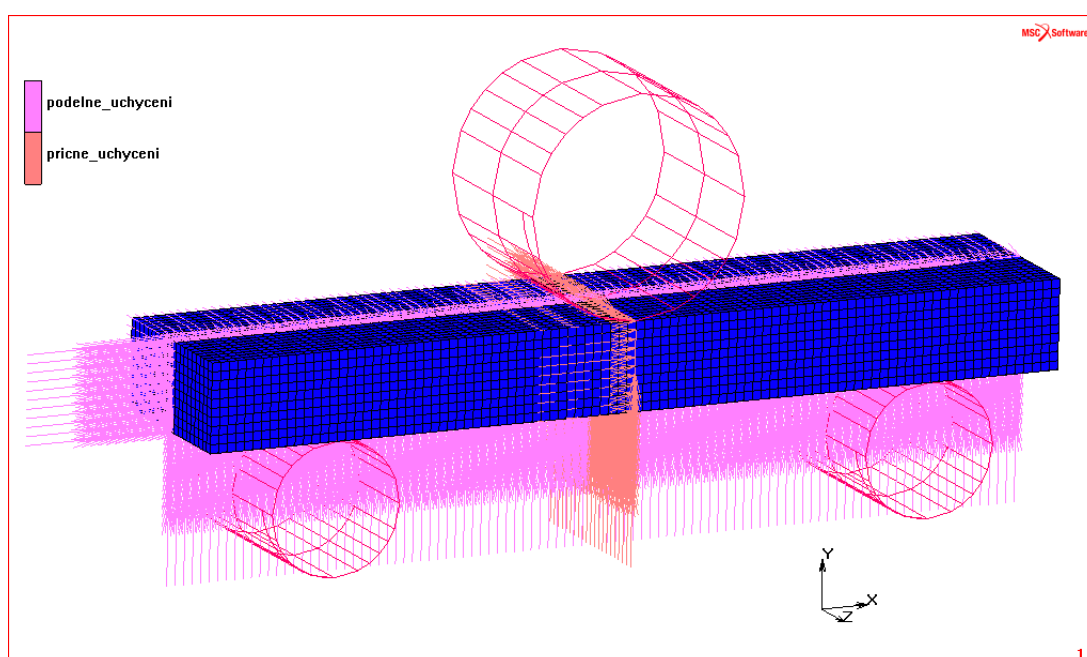


Obr. 3.15: Model procesu ohýbání v programu MSC.MARC/MENTAT

Na rozdíl od specializovaného tvářecího softwaru PAM Stamp 2G, v němž se přiřazují jednotlivé a jednotné části nástroje již připraveným tvářecím šablonám jako např.: akční člen – ohybník, pasivní člen – podpěry, univerzální program MARC/MENTAT pracuje pouze s nakreslenou geometrií, nerozeznává od sebe díly nástroje ani geometrii deformovatelného tělesa. Dalším krokem proto bylo definování nástroje, ohybku a jejich vzájemných kontaktů. V sekci Contact Bodies byly definovány jako pevné (nedeformovatelné) jak 2D kontaktní plochy podpěr tak i plocha ohybníku, u něhož byla zároveň definována trajektorie pohybu pomocí dráhy v závislosti na čase $s=s(t)$, jelikož je možné v tomto programu pro pevná tělesa zadat pouze jednu omezující podmínku. V programu PAM Stamp 2G byla trajektorie pohybu zadána rychlostí a dráhou pohybu, jenž má ohybník danou rychlostí urazit. Elementy ohybku byly poté definovány jako deformovatelné s již definovanými

materiálovými vlastnostmi. V této sekci byla také zadána u jednotlivých dílů hodnota koeficientu tření (Tab. 3.6).

Jelikož docházelo v simulaci k vyklouznutí ohybku do strany ven z nástroje, bylo nutné uchytit dvě svislé řady na sebe kolmých uzlů procházející přesně uprostřed ohybku vůči posunutí do stran i rotaci v požadovaném směru (Obr. 3.16). Při podélném uchycení bylo bodům sítě zabráněno v pohybu do směru osy z a rotaci kolem os x, y , pro příčné body zas do směru osy x a rotaci kolem os y, z . Tyto řady uzlů byly vybrány záměrně, protože zde k těmto posuvům a rotacím teoreticky nedochází ani v reálném procesu ohýbání.



Obr. 3.16: Uchycení uzlů proti posunutí

Posledním krokem bylo určení počtu kroků ohybníku a to jak při pohybu do ohybku, tak odjetí od něj, jenž má simulovat proces odpružení (Tab. 3.6). Na rozdíl od programu PAM Stamp 2G, který má definici odpružení přímo v sobě obsaženou tedy u programu MARC/MENTAT dochází k odpružení pomocí zpětného pohybu ohybníku.

Před samotným spuštěním simulace byly v nastavení simulace definovány např.: hodnoty přesnosti výpočtu, požadovaný výstup simulace, způsoby výpočtu atd.

Tab. 3.6: Seznam použitých dat pro proces ohýbání

Velikost elementu sítě (VxŠxD)	tloušťka 5 [mm]	tloušťka 10 [mm]	tloušťka 15 [mm]
	0,5x1x1	1x1x1	1x1x1
Počet kroků	tváření		odpružení
	10		3
Koeficient tření f [-]	0,12		

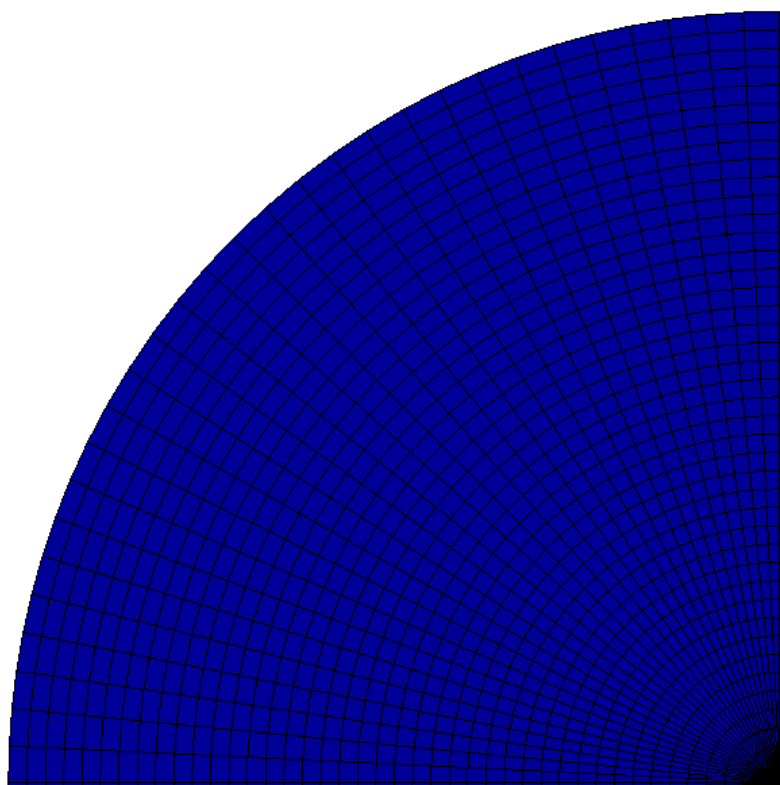
3.3.4.1. Definice procesů tažení

Protože je v možnostech programu MARC/MENTAT načítat již hotové geometrie z CAD systémů podobně jako v programu PAM Stamp 2G, bylo prvním krokem i zde v rámci testování přistoupeno k importu geometrie dílů nástroje ve formátu *.iges. Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, program MARC/MENTAT nerozeznává jednotlivé díly nástroje od sebe, pracuje pouze se zobrazenou geometrií. Po načtení tažníku se musely jeho křivky a plochy označit a seskupit do tzv. setu, který umožňuje skrývat jednotlivé díly a tím s nimi dále pracovat tak, jako v programu PAM Stamp 2G, kde je tato funkce po načtení dílů již automatická. Stejně se pak postupovalo i v případě tažnice a přidržovače (Obr. 3.18). Poté byla pomocí grafického preprocesoru nakreslena 2D plocha přístřihu, která byla následně zasíťována kruhovou sítí (Obr. 3.17). Tato síť je symetrická, proto dovoluje potřebné uchycení proti posunutí uvedeného v následujícím textu na rozdíl od automatické sítě použité v programu PAM Stamp 2G, který ale neumožňuje jinou volbu sítě. Velikost sítě byla přizpůsobena tak, aby celkový počet elementů přístřihu odpovídal počtu elementů použitých v konkurenčním programu (Tab. 3.7).

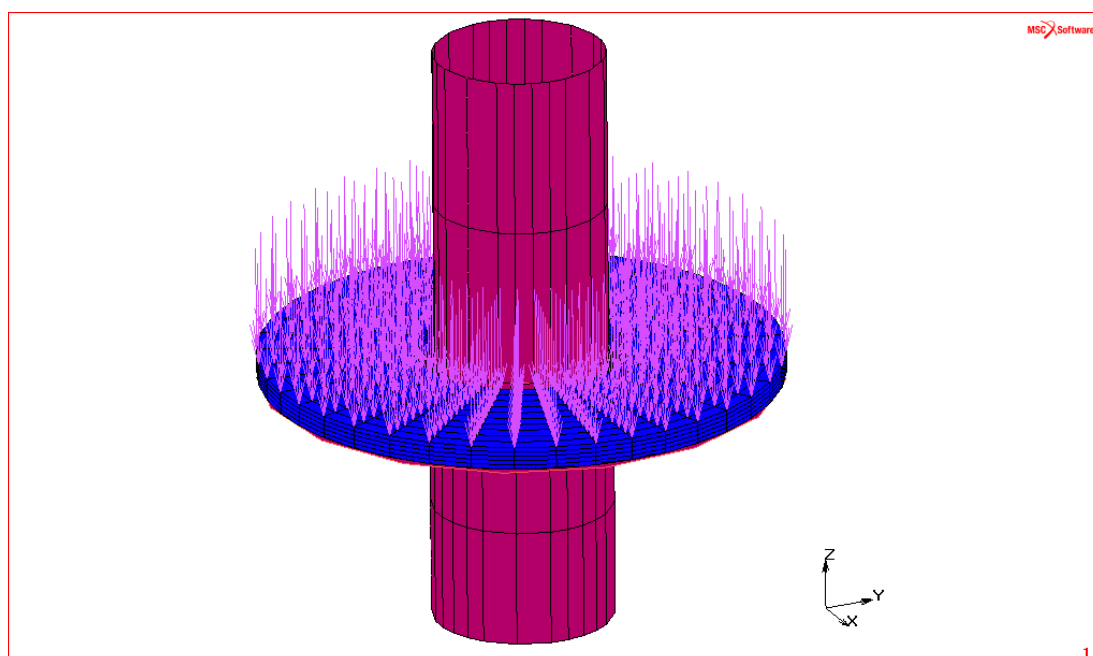
V následujícím kroku v sekci Geometric Properties bylo definováno, že elementy budou mít vlastnosti plechu s danou tloušťkou.

Další krok byla definice materiálových vlastností včetně anizotropie tak jako v předchozí kapitole.

Také definování dílů nástroje a jejich vzájemných kontaktů se v podstatě nelišilo, až na přidržovač, jehož plocha byla původně definována jako pevná, nakonec se však muselo přistoupit k jiné variantě.



Obr. 3.17: Detail kruhové sítě



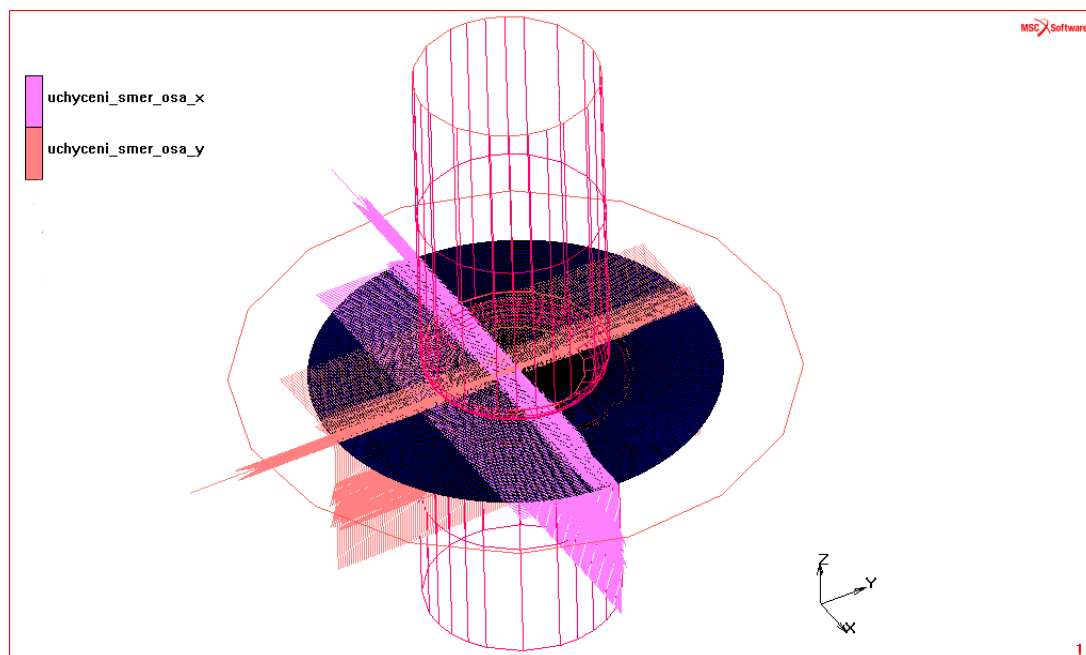
Obr. 3.18: Model procesu tažení v programu MSC.MARC/MENTAT se zobrazenou silou působící na přídržovač

Univerzální program MARC/MENTAT není pro procesy tváření primárně určen. U pevných 2D ploch nástrojů umožňuje kontrolu (ovládání) prováděného úkonu buď pomocí rychlosti nebo dráhy nebo velikostí a směrem působení síly plochy na okolní deformovaná tělesa. K této silové podmínce ovšem potřebuje centrální uzel deformované sítě, který určuje polohu působení síly a jen málo se odchyluje ze své prvotní polohy. Tuto podmínku centrálního uzlu splňují pouze uzly na okraji přístřihu ve směru 0° a 90° ke směru válcování, protože opouštějí působíště síly přidržovače jako poslední, rozhodně ovšem nesplňují požadavek polohově stabilního uzlu. Proto tato silová podmínka nemohla být použita.

Další varianta možného způsobu vyvození síly spočívala ve výpočtu velikosti stlačení přístřihu a posunutí přidržovače do této polohy. Tato metoda se ovšem ukázala jako velmi nepřesná a při simulaci procesu tažení docházelo k utržení dna kelímku.

Nakonec bylo přistoupeno k variantě deformovatelného přidržovače se zadáním modulu pružnosti $E=1 \cdot 10^6$ MPa, což činilo materiál velmi obtížně deformovatelný. Výhoda deformovatelných těles v tomto programu spočívá v možnosti zadání široké palety okrajových podmínek od kontroly pomocí kombinací dráhy, rychlosti, zrychlení, působení různých druhů tlaků i sil. Proto byla původní 2D plocha zasítována poměrně hrubou sítí elementů, vytažena do prostoru, aby vzniklo prakticky pevné a nedeformovatelné těleso přidržovače. Na prostorové elementy byly zadány podmínky posuvu a síly ve směru tváření. Aby byla síla přidržovače rovnoměrná, rozdělila se do všech vrchních povrchových uzlů tělesa (Obr. 3.17).

Dále, podobně jako u procesu ohýbání i u přístřihu docházelo k vyklouznutí modelu plechu z nástroje. V tomto případě byly všechny body ve směru 0° a 90° ke směru válcování zafixovány proti pohybu do kolmého směru a rotacím, kromě směru vtažení přístřihu přes rádius tažnice (Obr. 3.19). Totéž uchycení muselo být provedeno i u elementů přidržovače, kde byl umožněn pohyb tělesa jen ve směru tváření přístřihu.



Obr. 3.19: Uchycení uzlů proti posunutí (přidržovač skryt)

Následovalo určení počtu kroků a definování vlastností simulace jako v případě ohýbání (Tab. 3.7).

Tab. 3.7: Seznam použitých dat pro proces tažení

Velikost elementu sítě	(Šířka x Šířka) [mm]	
	$\approx 1 \times 1,5^\circ$ (automatické přizpůsobení velikosti)	
Počet kroků	uzavření formy	tváření
	1	10
Koeficient tření $f [-]$	0,08	

3.4. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ NUMERICKÉ SIMULACE

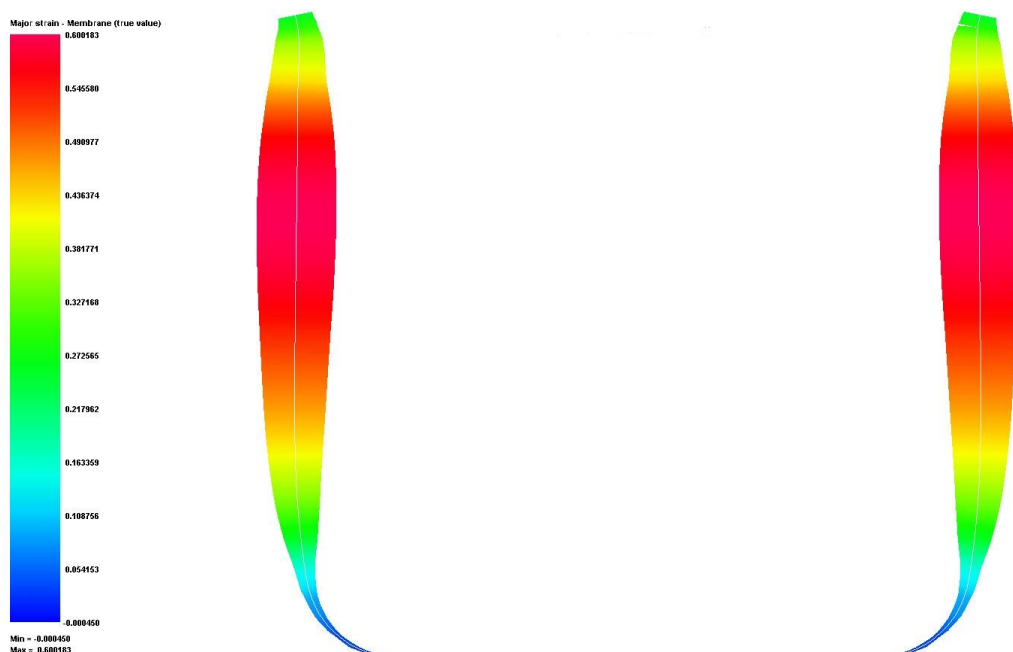
3.4.1. Vyhodnocení výsledků numerické simulace v programu PAM Stamp 2G

Podobně jako při definici procesů tváření i analýza výsledků pro oba tvářecí procesy probíhala jen s malými odlišnostmi, proto zde bude popsána společně se zdůrazněním jednotlivých rozdílů.

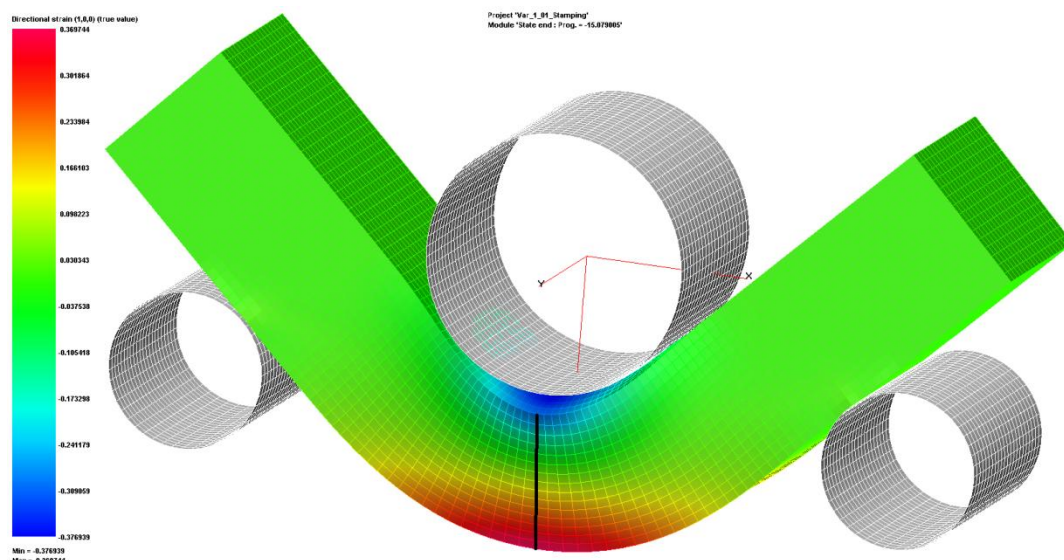
Prvním krokem bylo po dokončení simulace nastavení zobrazení požadované deformace v programu. U procesu tažení byla na výlisku zobrazena hlavní deformace φ (Major Strain) a na ohybku deformace φ_1 ve směru tloušťky (osa x).

Následujícím krokem bylo vytvoření řezů ve zvolených směrech kelímku (Obr. 3.20). Na výlisku byly řezy provedeny ve směru 0° , 45° , 90° ke směru válcování plechu, ze kterých byla vygenerována data přímo do textového souboru. U ohybku byly potřebné informace odečteny pomocí funkce Information přímo z uzlů modelu uprostřed ohybku, tj. kde se nachází oblast s největší skutečnou deformací φ_1 (Obr. 3.21).

Kompletní soubor všech zobrazených tloušťek obdélníkových tyčí, řezů a pohledů rotačního kelímku lze nalézt v příloze PŘÍLOHA 5.



Obr. 3.20: Zobrazení hlavního napětí φ v řezu rotačního kelímku ve směru 90° ke směru válcování



Obr. 3.21: Zobrazení skutečné deformace φ_1 ve směru osy x na ohybku tloušťky $t=15$ mm (černě označena křivka odběru požadovaných dat z uzlů)

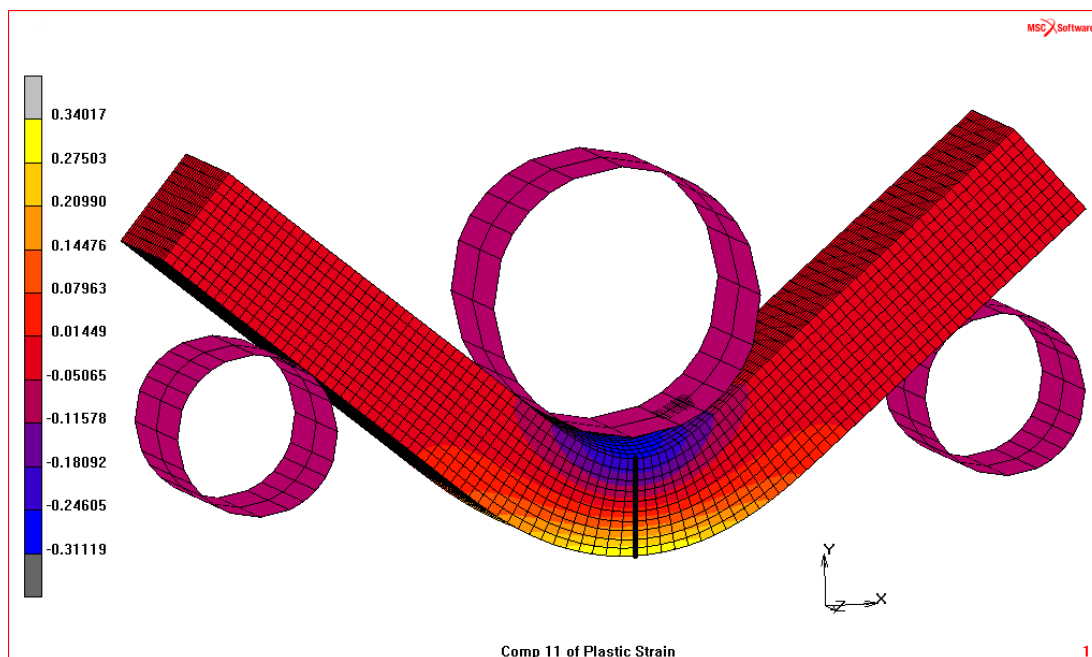
3.4.2. Vyhodnocení výsledků numerické simulace v programu MSC.MARC/MENTAT

Na rozdíl od definování procesů probíhalo vyhodnocení výsledků v postprocesoru MENTAT pro obě tvářecí operace shodně (Obr. 3.22).

Po zvolení zobrazování požadované skutečné deformace φ_1 ve směru osy x byl vybrán první požadovaný uzel tělesa, dále libovolný uzel uprostřed intervalu a nakonec uzel poslední. Program MARC/MENTAT si poté sám dopočítal chybějící uzly. Pro proces ohýbání následovalo vykreslení zvolených dat do grafu skutečné deformace φ_1 na posunutí jednotlivých uzlů ze své výchozí polohy a vygenerování dat do textového souboru.

Přes veškeré mé úsilí i úsilí pracovníků Katedry mechaniky, pružnosti a pevnosti se nepodařilo se zadanými technologickými parametry simulaci procesu tažení dle stručného návodu v manuálu programu úspěšně dokončit. V modelu docházelo k nesprávnému chování tvářených elementů, simulace byla programem v třetím kroku vyhodnocena jako chybná a následně zastavena.

Kompletní soubor všech zobrazených tloušťek obdélníkových tyčí lze nalézt v příloze PŘÍLOHA 5.



Obr. 3.22: Zobrazení skutečné deformace φ_1 ve směru osy x na ohybku tloušťky $t=10$ mm (černě označena křivka odběru požadovaných dat z uzlů)

3.5. ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

3.5.1. Vytvoření počátečních bodů

Pro obě tvářecí operace bylo potřeba určit počáteční bod, od kterého bude porovnání zpracovaných výsledků vycházet a jenž se výhodně nachází na vzorku před i po samotném tváření.

3.5.1.1. Určení počátečního bodu u ohybku

U tvářecí operace ohýbání se v dané oblasti měření teoreticky nenachází bod, který by před i po tváření zůstal na svém místě.

V úvahu přicházely tři varianty určení počátečního bodu.

a) Na povrchu ohybku

Ve všech případech, ať již skutečný ohyb či simulace, byla tloušťka vzorku na konci ohýbání různá. Navíc optický měřicí systém ARAMIS nedokáže pro porovnání sejmut celou měřenou oblast, zvláště pak u spodní a horní hrany z důvodu porušení patternu, kde se měl nacházet počáteční bod. Proto tato metoda nebyla zvolena.

b) Uprostřed tloušťky ohybku před ohýbáním

Tento bod optický systém Aramis také nedokáže přesně určit, protože stochastický vzor na povrchu vzorku nemá geometricky přesné rozmístění. I tato varianta byla zamítnuta.

c) Bod ležící na neutrální ose ohybku po ohýbání

Neutrální vrstvu lze snadno určit mocninným proložením naměřených bodů do grafu a odečtením vzdálenosti, na němž se deformace rovná nule. Při tomto odečítání však dochází k chybě v důsledku neexistujících naměřených bodů v nulové deformaci a nutnosti mocninného proložení křivky. I přes toto negativum byla po zvážení všech možností tato varianta doporučena k použití.

3.5.1.2. Určení počátečního bodu u výlisku

Zde byl jako nejvýhodnější počáteční bod zvolen uprostřed výlisku rotačního kelímku, který je výhodný jak svými geometrickými parametry, tak i tím, že leží uprostřed oblasti s malou a konstantní deformací.

3.5.2. Zpracování získaných dat z procesu ohýbání ze softwaru PAM Stamp 2G a optického systému ARAMIS

Zde byly potřebné hodnoty deformace a polohy bodů odečítány přímo z uzlů sítě. Polohy uzlů byly přepočítány s použitím Pythagorovy věty na vzdálenosti uzlů od sebe s nulovým uzlem nacházejícím se na tlakové hraně ohybku.

Z grafu vzdálenosti uzlů $l = l(\varphi_1)$ na skutečné deformaci φ_1 byla určena na dvě desetinná místa velikost vzdálenosti bodu od tlakové hrany ohybku s nulovou deformací φ_1 a tento bod byl zaveden jako počáteční.

Optický měřicí systém ARAMIS určil počáteční nulový uzel nejvíce deformovaný v tlakové oblasti, to ovšem neznamená uzel na tlakové hraně ohybku, protože tento systém nesnímá měřenou oblast až k hranám. Zavedení počátečního bodu pak probíhalo stejně jako u softwaru PAM Stamp 2G.

3.5.3. Zpracování získaných dat z procesu tažení ze softwaru PAM Stamp 2G

Jelikož byl tímto programem zvolen počáteční nulový bod výlisku na jedné z hran v řezu, musely se délkové rozměry přepočítat. Největší hodnota vzdálenosti tj. na druhé straně hrany kelímku byla rozdělena na dva stejné díly a pomocí interpolace dvou nejbližších okolních hodnot deformace φ od středu zjištěna její příslušná hodnota. Tyto již přepočítané data byly vyneseny do grafu $l_s = l_s(\varphi)$. Postup byl použit u všech třech řezů ve směru 0° , 45° , 90° .

3.5.4. Zpracování získaných dat z procesů ohýbání ze softwaru MSC.MARC/MENTAT

Data posunutí jednotlivých uzlů ze své prvotní polohy na skutečnou deformaci φ_1 byla jednoduchým vzorcem s použitím Pythagorovy věty pro zjednodušení převedena do stejného stavu, jaký byl použit v programu PAM Stamp 2G a dále zpracována shodným způsobem.

4. DISKUZE VÝSLEDKŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

4.1. DISKUZE VÝSLEDKŮ PRO PROCES OHÝBÁNÍ

Z naměřených a vypočítaných průběhů křivek vzdálenosti od neutrální osy na skutečné deformaci φ_I v ose x si lze na první pohled v grafech (Obr. 4.1, 4.2, 4.3.) všimnout chybné extrapolace (prokládání uzlů) v koncových uzlech všech tří tloušťek obdélníkové tyče S235JR+M. U tloušťky tyčí $t=10$ mm a $t=15$ mm v integrovaném softwaru ARAMIS k tomuto zkrácení nedošlo jen díky chybějícím posledním uzlům v tlakové části ohybku z důvodu přílišné deformace a následném poškození patternu. Tato extrapolace se nazývá průměrová a změna byla umožněna jen v programu MARC/MENTAT, proto byla do grafů zahrnuta i extrapolace překládaná, která hodnoty skutečné deformace vykresluje věrohodněji v souladu s teorií ohýbání.

Dalšího trendu, jež lze v grafech nalézt je zhoršení přesnosti simulace s většími tloušťkami ($t=10$ mm, $t=15$ mm) obdélníkové tyče.

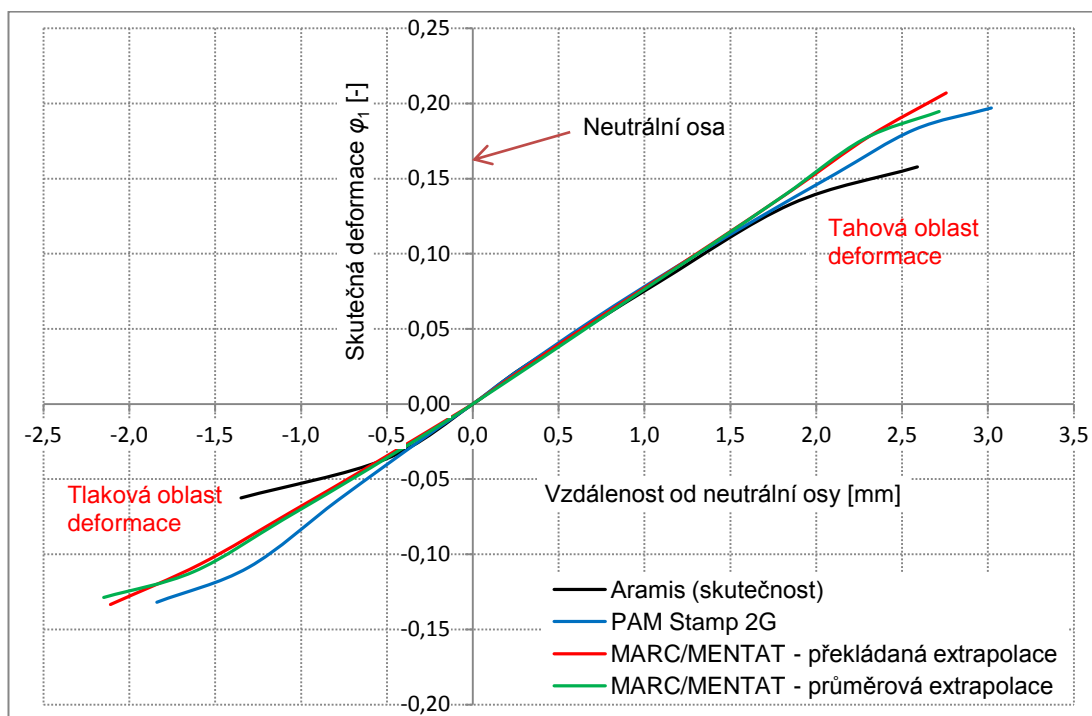
V grafech pro tloušťku tyče $t=10$ mm a $t=15$ mm lze jasně pozorovat, že program PAM Stamp 2G na rozdíl od programu MARC/MENTAT určil polohu neutrální osy výrazně lépe a konečné uzly v tahové části ohybku jsou více ($t=15$ mm) či velmi podobně ($t=10$ mm) vzdáleny od neutrální osy než uzly z integrovaného softwaru ARAMIS, který neměří skutečnou deformaci až od hrany ohybku. Neutrální osa v programu MARC/MENTAT je posunuta do tahové oblasti od reálné neutrální osy minimálně v případě tloušťky tyče $t=10$ mm o 0,61 mm a při $t=15$ mm o 1,74 mm. Toto posunutí bohužel degradovalo výsledky tohoto programu v tahové části ohybku vychýlením křivky od skutečné deformace naměřené a vykreslené optickým měřicím systémem ARAMIS.

Na rozdíl od tahové části ohybku je v tlakové části možno pozorovat velmi dobrou shodu skutečnosti a simulace programu MARC/MENTAT odchylující je den v setinách deformace.

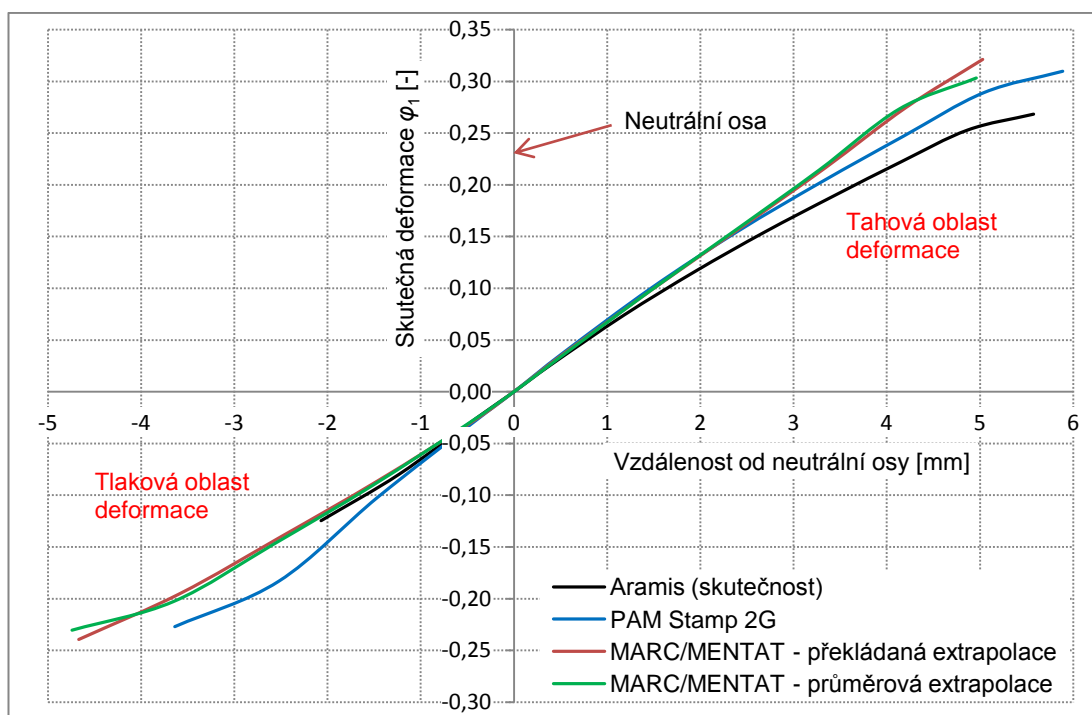
Nebýt nepřesně určené neutrální osy, byl by program MARC/MENTAT celkově přesnější.

Přesnost simulace v grafu pro tloušťku tyče $t=5$ mm obou porovnávaných programů je prakticky shodná se skutečnými hodnotami. Z grafu je navíc patrné

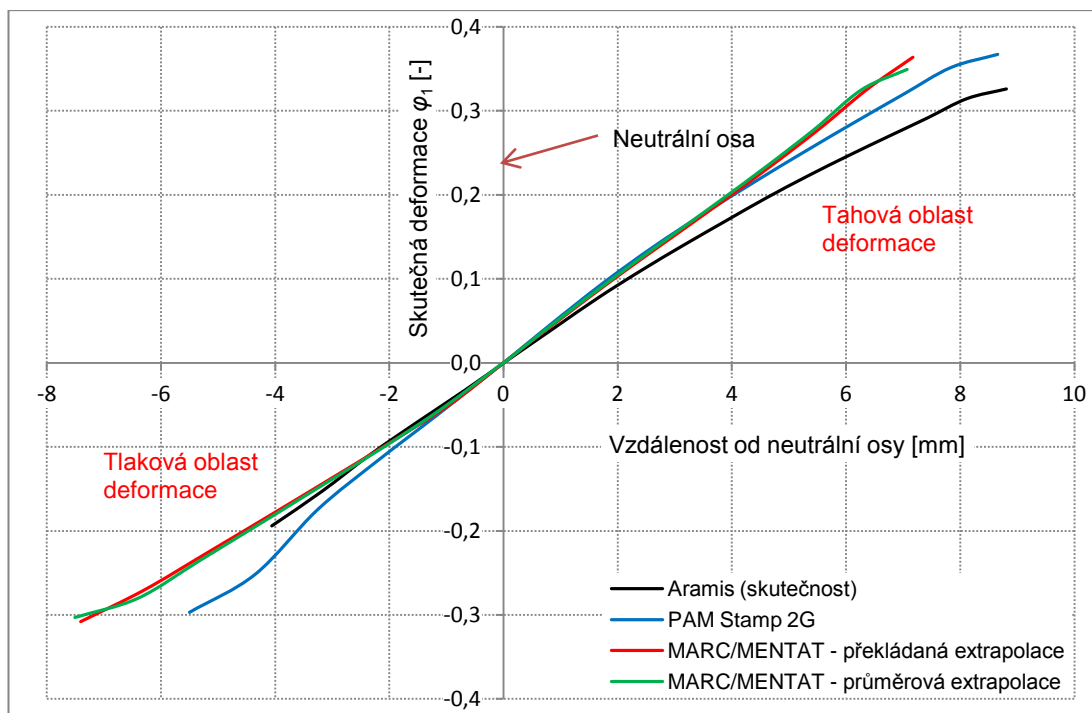
výrazně větší tloušťky tyče v simulačních programech, což je dáno již několikrát zmíněnou nemožností systému ARAMIS snímat data až k hraně ohybu.



Obr. 4.1: Graf vzdálenosti od neutrální osy na skutečnou deformaci φ_1 pro obdélníkovou tyč S235JR+M tloušťky $t=5$ mm



Obr. 4.2: Graf vzdálenosti od neutrální osy na skutečnou deformaci φ_1 pro obdélníkovou tyč S235JR+M tloušťky $t=10$ mm

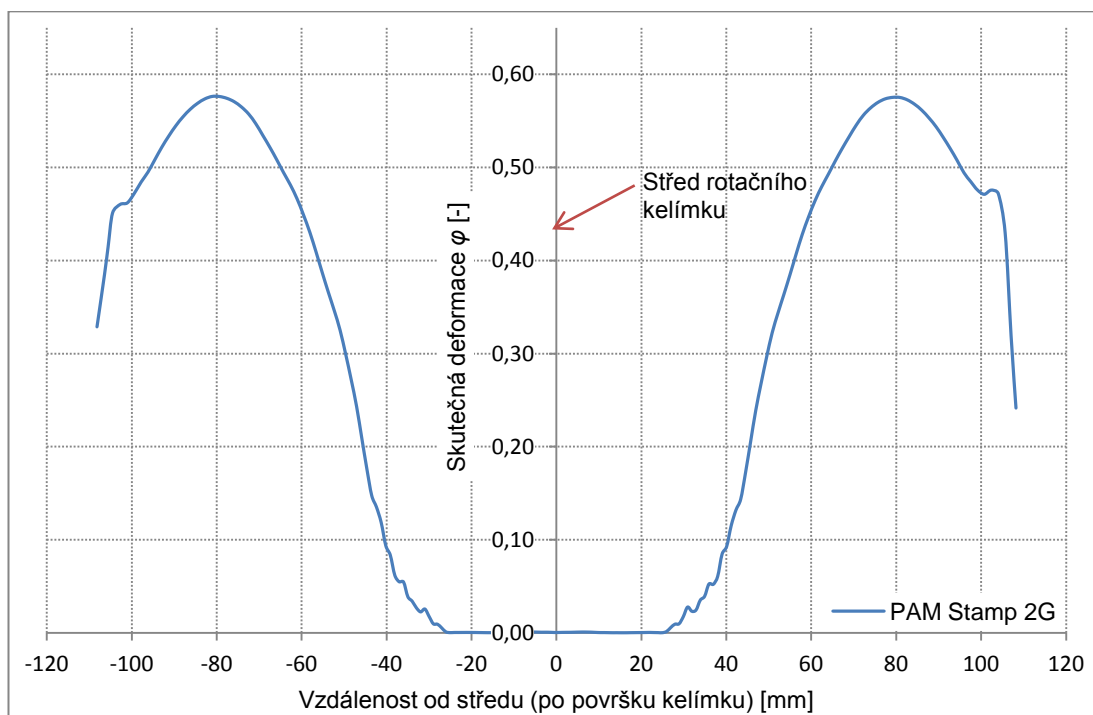


Obr. 4.3: Graf vzdálenosti od neutrální osy na skutečnou deformaci φ_I pro obdélníkovou tyč S235JR+M tloušťky $t=15$ mm

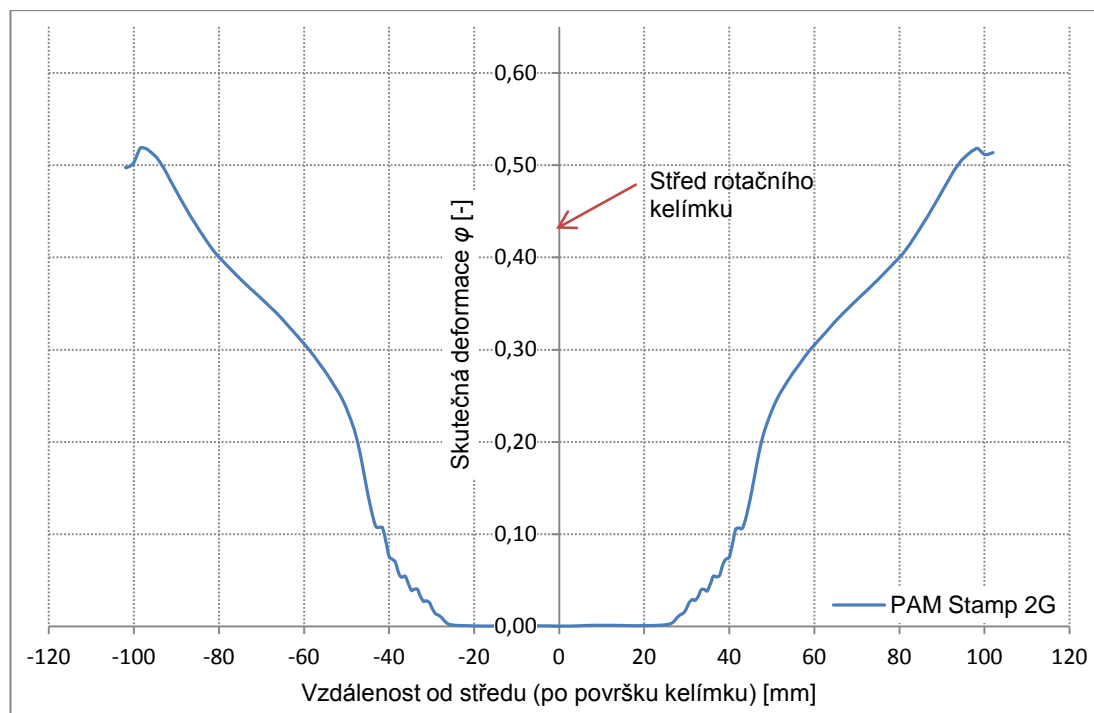
4.2. DISKUZE VÝSLEDKŮ PRO PROCES TAŽENÍ

Z průběhu křivek vzdálenosti od středu kelímku na hlavní deformaci φ pro výtažek z plechu DC05+ZE75/75 B P lze na první pohled v grafech (4.4, 4.5, 4.6) pozorovat absence jak křivek výsledků simulace v programu MSC.MARC/MENTAT z důvodů uvedených v kapitole 3.4.2, tak hodnot experimentálně zjištěných pomocí optického měřicího systému ARGUS. Přes veškerou snahu pracovníků firmy ŠKODA-AUTO, a.s. se nepodařilo požadovaná data z povrchu výtažku nasnímat. Konkrétně integrovaný systém ARGUS nebyl schopen elektrolyticky nanesené body na povrchu kelímku pomocí CCD kamery nasnímat (body neviděl). Příčina tohoto nezdaru spočívala v povrchové úpravě plechu fosfátováním a nevhodně zvolené metodě nanášení deformační sítě. Body z elektrolytického naleptávání nebyly dostatečně kontrastní i přes výrazně delší dobu (několikahodinovou) procedury nanášení sítě. Jiný způsob leptání deformační sítě na Katedře strojírenské technologie není k dispozici. Z tohoto poznatku vyplývá zjištění, že pro takovito způsob elektrolyticky naleptané deformační sítě na fosfátovém povrchu je optický systém ARGUS a jeho snímací možnosti nevhodný.

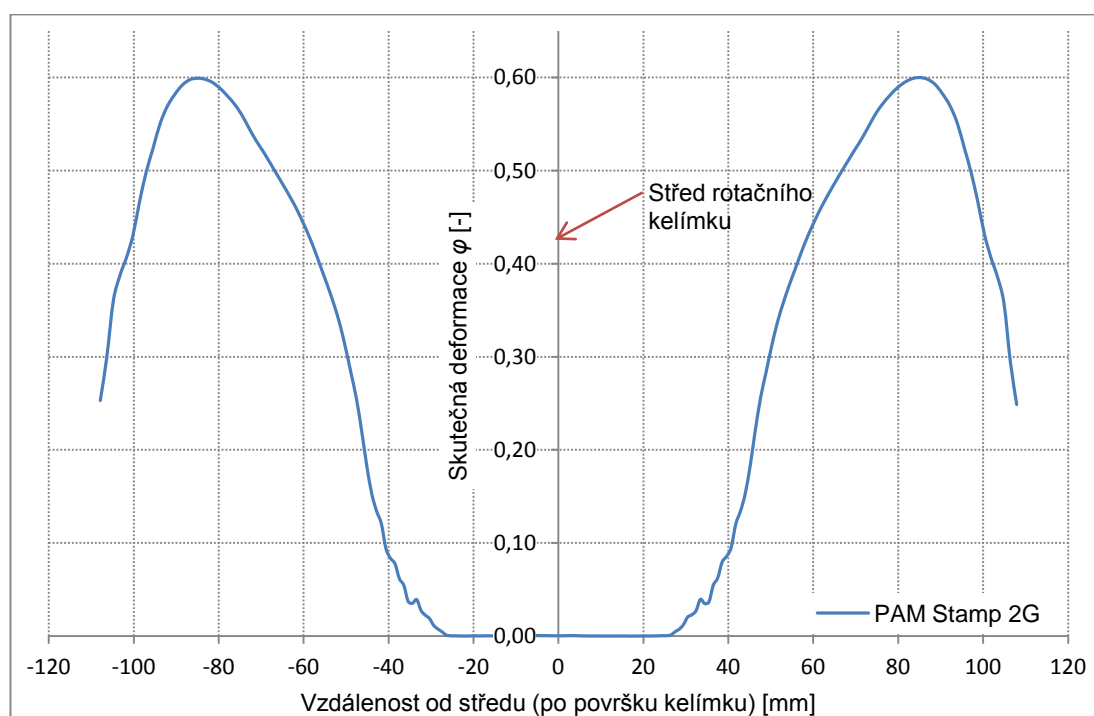
Z vypočítaných průběhů křivek a rozložení deformace na obrázku ze simulace (viz. PŘÍLOHA 5) v programu PAM Stamp 2G lze konstatovat přibližnou shodu tvarů křivek s teoretickými znalostmi anizotropicky tvářených plechů. Velikost „uší“ (zvlnění) kelímku je v případě směru 0° - 6,2 mm a v případě směru 90° - 5,9 mm vůči směru 45° ke směru válcování. Největší výška kelímku je proto ve směru 0° a to 108,2 mm. Celkově největší hlavní deformace φ byla dosažena ve směru 90° ve vzdálenosti 85,1 mm od středu kelímku a to $\varphi=0,60$. Největší deformace ve směru 0° byla dosažena ve vzdálenosti 75,7 mm od středu kelímku a to $\varphi=0,57$, ve směru 45° pak 98,4 mm $\rightarrow \varphi=0,52$.



Obr. 4.4: Graf vzdálenosti od středu kelímku na hlavní deformaci φ pro výtažek z plechu DC05+ZE75/75 B P ve směru 0° ke směru válcování



Obr. 4.5: Graf vzdálenosti od středu kelímku na hlavní deformaci φ pro výtažek z plechu DC05+ZE75/75 B P ve směru 45° ke směru válcování



Obr. 4.6: Graf vzdálenosti od středu kelímku na hlavní deformaci φ pro výtažek z plechu DC05+ZE75/75 B P ve směru 90° ke směru válcování

5. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo aplikovat numerickou simulaci pro technologické procesy tváření pomocí dvou konkurenčních simulačních softwarů, PAM Stamp 2G a MSC.MARC/MENTAT používající stejný princip MKP. Pro porovnání byly vybrány tvářecí procesy jak plošné, které reprezentuje proces tažení kruhového přístřihu, tak objemové, jehož reprezentantem je proces ohýbání tlusté obdélníkové tyče. Kritériem přesnosti simulace tvářecí operace byly zvoleny hodnoty hlavních deformací φ , jejichž skutečné hodnoty byly naměřeny na skutečných zkušebních vzorcích pomocí optických měřicích systémů firmy GOM GmbH, ARGUS a ARAMIS.

V případě objemového tvářecího procesu ohýbání bylo dosaženo rozdílných výsledků simulace obou programů. Program MSC.MARC/MENTAT byl v přesnosti své simulace v tlakové oblasti deformace úspěšnější, ovšem díky chybně umístěné neutrální ose se jeho výsledky v tahové oblasti tyče odchýlili více než v programu PAM Stamp 2G.

U plošného tvářecího procesu tažení kruhového přístřihu nebylo experimentální snímání deformační sítě přetvořeného přístřihu úspěšné. Příčina nezdaru spočívala v povrchové úpravě plechu fosfátováním. Z tohoto poznatku vyplývá zjištění, že pro takovito způsob elektrolyticky naleptané deformační sítě na fosfátovém povrchu je optický systém ARGUS a jeho snímací možnosti nevhodný.

Také v programu MSC.MARC/MENTAT se bohužel nepodařilo se stručným postupem v manuálu programu i kontaktování help servisu společnosti simulaci úspěšně dokončit. Práce s takto sofistikovaným softwarem, jak už bylo řečeno v úvodu práce, vyžaduje vysoké nároky na znalosti a zkušenosti obsluhy. Tento program ovšem nebyl na Katedře mechaniky, pružnosti a pevnosti na proces tažení dosud použit. Program MSC.MARC/MENTAT proto nelze pro tento technologický proces tažení doporučit.

Dalším možným pokračováním této práce by proto mohlo být zkoumání možností programu MSC.MARC/MENTAT v technologických procesech tváření. Při tomto zkoumání však musí bezpodmínečně spolupracovat obě katedry, konkrétně KSP k zajištění materiálových dat, technologie a kinematiky tvářecího procesu a KMP zajišťující výpočtářskou část úlohy, tj. obsluha nastavení parametrů

konečnoprvkového výpočtu, protože jenom kvalitní zadání všech podmínek výpočtu může zajistit kvalitní simulaci.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LENFELD, P.: *Technologie II. – 1. část (tváření kovů)*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-466-5
- [2] PROCHÁTKA, J.; ZAPOTIL, M.; NĚMEC, M.; NOVOTNÝ J.: *Technologie slévání, tváření a svařování*. Praha: ČVUT v Praze, 1990. ISBN 80-01-00345-0
- [3] DOSTÁL, J.: *Odpružení při volném ohybu, Diplomová práce*. Liberec : TU v Liberci, 2012.
- [4] ČADA, R.: *Technologie I – studijní opora*. Ostrava : Ediční středisko VŠB - TUO, 2007. ISBN 978-80-248-1507-7
- [5] FOREJT, M.: *Teorie tváření*. Brno : Nakladatelství Vysokého učení technického v Brně, 1992. ISBN 80-214-0415-9
- [6] DVOŘÁK, M., a kolektiv.: *Technologie II*. Brno : Akademická nakladatelství CERM, s.r.o. ISBN 80-214-2683-7
- [7] MACHEK, V.; SODOMKA, J.: *Nauka o materiálu – 2. část*. Praha : ČVUT v Praze, 2007. ISBN 978-80-01-03686-0
- [8] PTÁČEK, L. a kol.: *Nauka o materiálu I*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2003. ISBN 80-7204-283-1
- [9] PLEŠIVEC, M.: *Vliv teploty na tvaritelnost hlubokotažných plechů, Bakalářská práce*. Liberec : TU v Liberci, 2009.
- [10] SOBOTKA, J.: *Hodnocení mechanických vlastností nových vysokopevnostních materiálů, Disertační práce*. Liberec : TU v Liberci, 2008.
- [11] <www.mcae.cz>, [10.03.2012].
- [12] <www.gom.com>, [10.03.2012].
- [13] BĚHÁLEK, L.; LENFELD, P.: *Sborník přednášek se zaměřením na tváření kovů a plastů*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2004. ISBN 80-7083-856-6
- [14] TEPLÝ, B.: *Metoda konečných prvků*. Brno : Vysoké učení technické, 1991. ISBN 80-2140-234-2
- [15] *Počítačová simulace tváření plechů*. <www.mmspektrum.com>, [18.03.2012]
- [16] RADIMĚŘSKÝ, A.: *Využití simulačního programu PAM-STAMP TM při optimalizaci technologických podmínek tažení*. Liberec : TU v Liberci, 2002.

- [17] FRYDRÝŠEK, K.; FUSEK, M.; HRABEC, J.: *Praktikum software MSC.MARC/MENTAT – 2. část*. Ostrava : Ediční středisko VŠB - TUO, 2010.
ISBN 978-80-248-2211-2
- [18] PERTUŽELKA, J.; SONNEK, P.: *Tvařitelnost kovových materiálů*. 2007.
<<http://www.345.vsb.cz/jiripetruzeka/Texty/TvCELEupr.pdf>> [23.03.2012]
- [19] FÜRBAACHER, I.: *Lexikon ocelí – svazek 1*. Praha : Verlag Dashöfer, 2007.
ISBN 80-86897-12-5

7. SEZNAM PŘÍLOH:

PŘÍLOHA 1: Inspekční certifikát materiálu obdélníkové tyče S235JR+M

PŘÍLOHA 2: Materiálové vlastnosti plechu DC05+ZE 75/75 B P dle normy
ČSN EN 10 152

PŘÍLOHA 3: Kompletní soubory naměřených a vypočítaných dat pro
koeficienty normálové anizotropie

PŘÍLOHA 4: Kompletní soubory naměřených, odečtených a vypočítaných dat
regresních koeficientů C , n a φ_0 včetně regresních grafů

PŘÍLOHA 5: Kompletní soubor všech zobrazených tloušťek obdélníkových
tyčí, řezů a pohledů rotačního kelímku


PŘÍLOHA 1: Inspekční certifikát materiálu obdélníkové tyče S235JR+M

Inspekční certifikát

A02 INSPECTION CERTIFICATE "3.1"
EN 10204:2004



A03 Document No: 16638/2011

A06	Manufacturer's works order number: 1451/1784901		A10	Delivery Advise No.: 110528										
A09	Supplier Reference No.:													
A07	Purchase Order No.: 354100086/301 1100242217 000001		A06	Customer/consignee:										
B13	Real weight: 2485 kg													
B12	Theoretical weight:													
B01 B02 B03 B04 B05 B09	Product, Dimensions, Steel designation, Condition,- Terms of Delivery, Any supplementary requirements : FLAT BARS P20X10 LENGTH: 06100 Hromada SJV S235JR+M EN 10058:2003 ČSN EN 10025-2:2005													
C71	Chemical Analysis of Liquid Alloy %											B08		
B07	Heat No.:	C70	C	Mn	Si	P	S	N2	Cu	Ni	Cr	Mo	Quantity	Bunches
	29566Y	0	0.10	0.70	0.203	0.009	0.011	0.007	0.06	0.03	0.05	0.007	262	1
<input checked="" type="checkbox"/> 1. Continuation see Attachment														
5	Test results:		2. Tensile test					4. Impact Bending test			Contraction	Ratio Ref/Pm		
	Test results		C02	C11 Yield Point	C12 Tensile Strength		C13 Elongation	C03 Test temperature (°C)	C40	C41	C50	C51		
	C00 Test No.:		MPa	MPa	MPa		% A5		C04min: J					
B07	Heat No.:	C04 Regulation:	235	360 510	min. 26.0				ØC43	C42				
	29566Y	000361	0	283	419		38.2							
<input type="checkbox"/> 1. Continuation see Attachment														
C52	Bend Test () conforming <input type="checkbox"/>													
B06 Z04	Marking of the product according to the contract													
 <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; font-size: small;"> Designed for the following applications: civil and machine engineering Weldability: guaranteed through carbon equivalent (Ceq) </div>														
C93	The mass activity of ionizing radiation value in liquid alloy analysis does not exceed 100 Bq/kg.													
Z01	The producer confirms that this produkt conforms to the requirement of the order of the purchase agreement and that it was tested, inspected according to the technical requirements of the order.													
D01	The inspection and the test were carried out on the delivered produkt or on a produkt test unit.													

Z02 Date / Issued by: 01.12.2011/ DRNO

Z03

A05

A01 ArcelorMittal Ostrava a.s. TEL: ++420-595682303
Vratimovská 689 FAX: ++420-595682114
707 02 Ostrava-Kunčice
Czech Republic

ArcelorMittal Ostrava a.s.
Vratimovská 689, 707 02 Ostrava-Kunčice
IČ: 46193258

ArcelorMittal
017

WORKS INSPECTOR
IDENTIFICATION No. 3
p. Radomír Poledník
PHONE: ++420 595682721

replaces seal and signature
N14023

PŘÍLOHA 2: Materiálové vlastnosti plechu z nelegované jakostní hlubokotažné oceli DC05+ZE75/75 B P dle normy ČSN EN 10 152 [19]

D - ploché ocelové výrobky k tváření za studena

C - válcováno za studena

05 - rozlišení jakosti oceli

+ZE75/75 - elektroliticky pokovený zinkem z obou stran o hmotnosti povlaku min.
75 g/m² (pro 3 vzorky)

B - lepší jakost povrchu

P - fosfátovaný povrch

Chemické složení [hm. %]				
C	Si	Mn	P	S
max. 0,06	-	max. 0,35	max. 0,025	max. 0,025

Mechanické vlastnosti	
Stav	-
Mez kluzu R_{eL} nebo $R_{p0,2}$ [MPa] min.	140-190
Mez pevnosti R_m [MPa]	270-330
Tažnost A_{80mm} [%] min.	39
Součinitel normálové anizotropie r_{90} min.	1,9
Exponent deformačního zpevnění n_{90} min.	0,19

PŘÍLOHA 3: Kompletní soubory naměřených a vypočítaných dat pro koeficienty normálové anizotropie

1) Směr odebírání vzorku 0° ke směru válcování:

Vzorek 0_1	$b_{\text{začátek}}$ [mm]	$b_{\text{střed}}$ [mm]	b_{konec} [mm]	l_0 [mm]	l_1 [mm]
Před zkouškou b_0 [mm]	20,107	20,108	20,111	79,9946	96,0882
Po zkoušce b_1 [mm]	17,988	17,877	17,984		

Vzorek 0_1	Δl [mm]	Průměrná hodnota b_0 [mm]	Průměrná hodnota b_1 [mm]	r [mm]
Hodnota	16,0936	20,109	17,950	1,629
Směrodatná odchylka	-	0,002	0,063	-

Vzorek 0_2	$b_{\text{začátek}}$ [mm]	$b_{\text{střed}}$ [mm]	b_{konec} [mm]	l_0 [mm]	l_1 [mm]
Před zkouškou b_0 [mm]	20,103	20,104	20,106	79,9872	95,9648
Po zkoušce b_1 [mm]	18,036	17,923	17,956		

Vzorek 0_2	Δl [mm]	Průměrná hodnota b_0 [mm]	Průměrná hodnota b_1 [mm]	r [mm]
Hodnota	15,9776	20,104	17,972	1,603
Směrodatná odchylka	-	0,002	0,058	-

Vzorek 0_3	$b_{\text{začátek}}$ [mm]	$b_{\text{střed}}$ [mm]	b_{konec} [mm]	l_0 [mm]	l_1 [mm]
Před zkouškou b_0 [mm]	20,104	20,103	20,102	79,9886	95,9116
Po zkoušce b_1 [mm]	18,032	17,923	17,936		

Vzorek 0_3	Δl [mm]	Průměrná hodnota b_0 [mm]	Průměrná hodnota b_1 [mm]	r [mm]
Hodnota	15,923	20,103	17,964	1,630
Směrodatná odchylka	-	0,001	0,060	-

2) Směr odebírání vzorku 45° ke směru válcování:

Vzorek 45_1	$b_{\text{začátek}}$ [mm]	$b_{\text{střed}}$ [mm]	b_{konec} [mm]	l_0 [mm]	l_1 [mm]
Před zkouškou b_0 [mm]	20,105	20,108	20,108	79,9522	95,9218
Po zkoušce b_1 [mm]	18,113	18,031	18,171		

Vzorek 45_1	Δl [mm]	Průměrná hodnota b_0 [mm]	Průměrná hodnota b_1 [mm]	r [mm]
Hodnota	15,9696	20,107	18,105	1,358
Směrodatná odchylka	-	0,002	0,070	-

Vzorek 45_2	$b_{\text{začátek}}$ [mm]	$b_{\text{střed}}$ [mm]	b_{konec} [mm]	l_0 [mm]	l_1 [mm]
Před zkouškou b_0 [mm]	20,106	20,108	20,109	80,0600	96,0260
Po zkoušce b_1 [mm]	18,100	18,032	18,191		

Vzorek 45_2	Δl [mm]	Průměrná hodnota b_0 [mm]	Průměrná hodnota b_1 [mm]	r [mm]
Hodnota	15,966	20,108	18,108	1,359
Směrodatná odchylka	-	0,002	0,080	-

Vzorek 45_3	$b_{\text{začátek}}$ [mm]	$b_{\text{střed}}$ [mm]	b_{konec} [mm]	l_0 [mm]	l_1 [mm]
Před zkouškou b_0 [mm]	20,111	20,114	20,113	80,036	95,9682
Po zkoušce b_1 [mm]	18,116	18,051	18,193		

Vzorek 45_3	Δl [mm]	Průměrná hodnota b_0 [mm]	Průměrná hodnota b_1 [mm]	r [mm]
Hodnota	15,9322	20,113	18,120	1,351
Směrodatná odchylka	-	0,002	0,071	-

3) Směr odebrání vzorku 90° ke směru válcování:

Vzorek 90_1	$b_{\text{začátek}}$ [mm]	$b_{\text{střed}}$ [mm]	b_{konec} [mm]	l_0 [mm]	l_1 [mm]
Před zkouškou b_0 [mm]	20,113	20,114	20,118	80,0362	95,9907
Po zkoušce b_1 [mm]	17,835	17,724	17,876		

Vzorek 90_1	Δl [mm]	Průměrná hodnota b_0 [mm]	Průměrná hodnota b_1 [mm]	r [mm]
Hodnota	15,9545	20,115	17,812	2,021
Směrodatná odchylka	-	0,003	0,079	-

Vzorek 90_2	$b_{\text{začátek}}$ [mm]	$b_{\text{střed}}$ [mm]	b_{konec} [mm]	l_0 [mm]	l_1 [mm]
Před zkouškou b_0 [mm]	20,110	20,112	20,114	80,005	96,0158
Po zkoušce b_1 [mm]	17,897	17,735	17,888		

Vzorek 90_2	Δl [mm]	Průměrná hodnota b_0 [mm]	Průměrná hodnota b_1 [mm]	r [mm]
Hodnota	16,0108	20,112	17,840	1,916
Směrodatná odchylka	-	0,002	0,091	-

Vzorek 90_3	$b_{\text{začátek}}$ [mm]	$b_{\text{střed}}$ [mm]	b_{konec} [mm]	l_0 [mm]	l_1 [mm]
Před zkouškou b_0 [mm]	20,105	20,101	20,099	80,0142	97,2595
Po zkoušce b_1 [mm]	17,699	17,542	17,697		

Vzorek 90_3	Δl [mm]	Průměrná hodnota b_0 [mm]	Průměrná hodnota b_1 [mm]	r [mm]
Hodnota	17,2453	20,102	17,646	2,008
Směrodatná odchylka	-	0,003	0,090	-

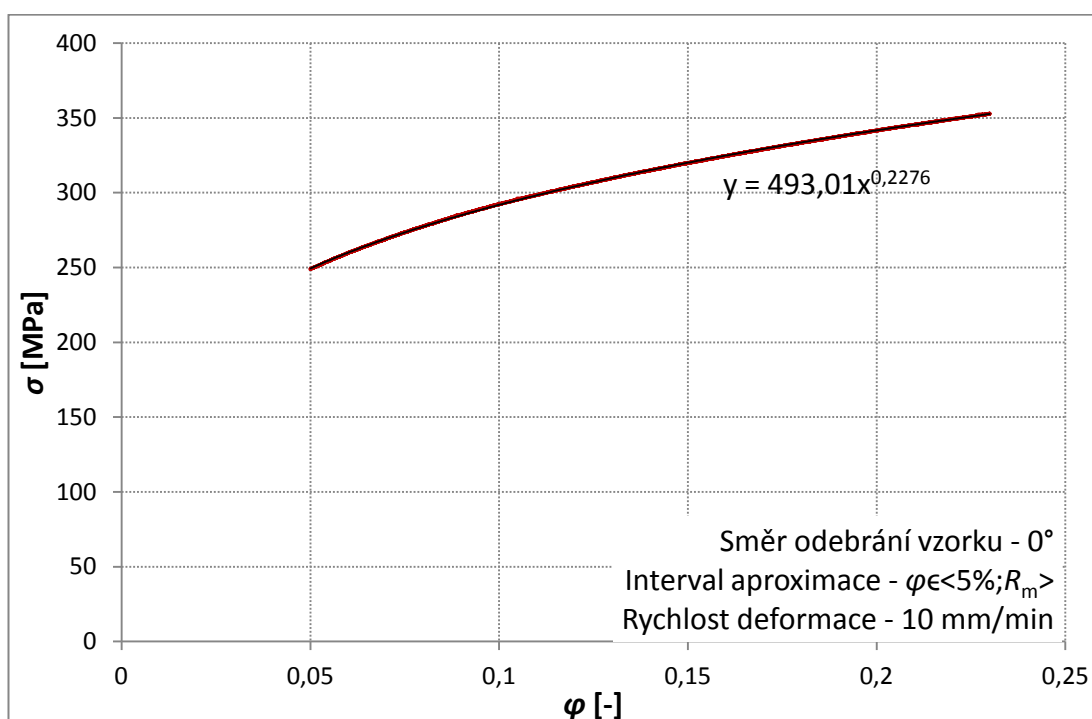
4) Průměrné hodnoty a odchylky koeficientu normálové anizotropie

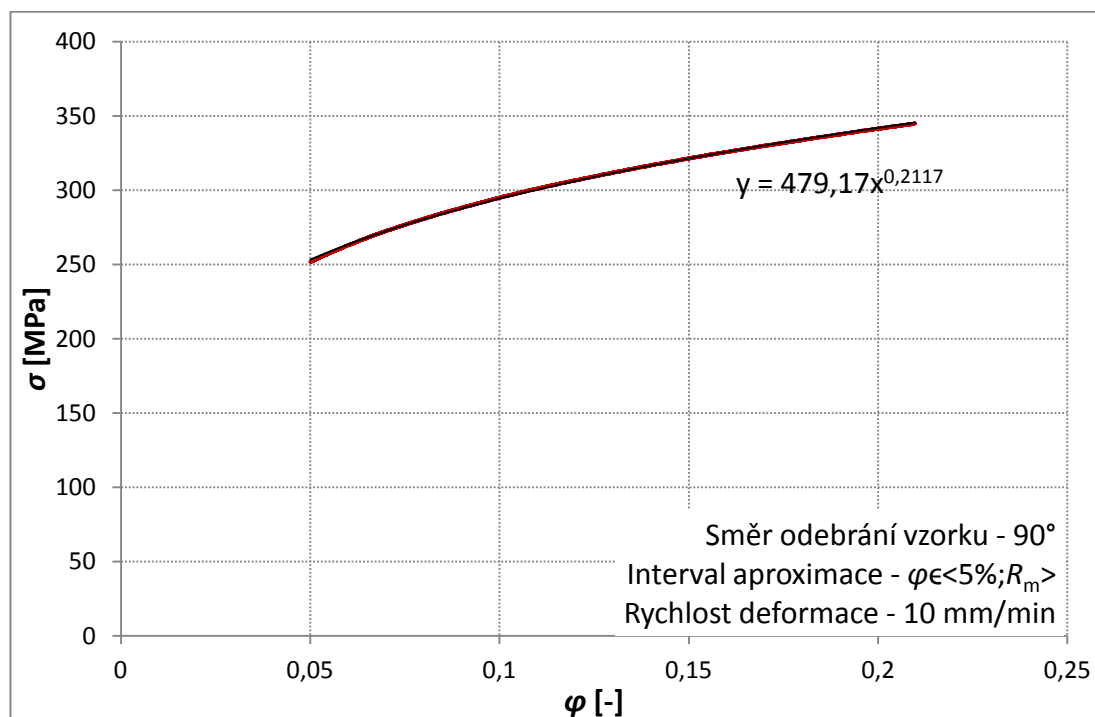
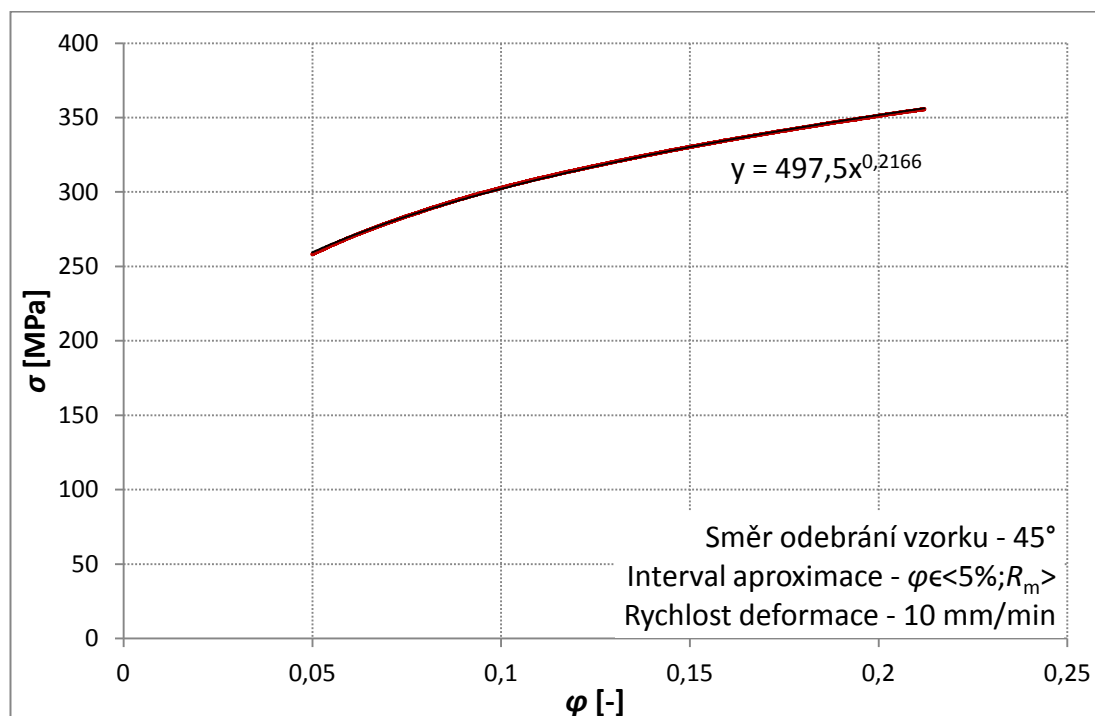
Směr odebrání vzorku	Průměrná hodnota r [-]	Směrodatná odchylka s
0°	1,6205	0,016
45°	1,3562	0,004
90°	1,9820	0,057

PŘÍLOHA 4: Kompletní soubory naměřených, odečtených a vypočítaných dat regresních koeficientů C , n a φ_0 včetně regresních grafů

1) Plech DC05+ZE75/75 B P

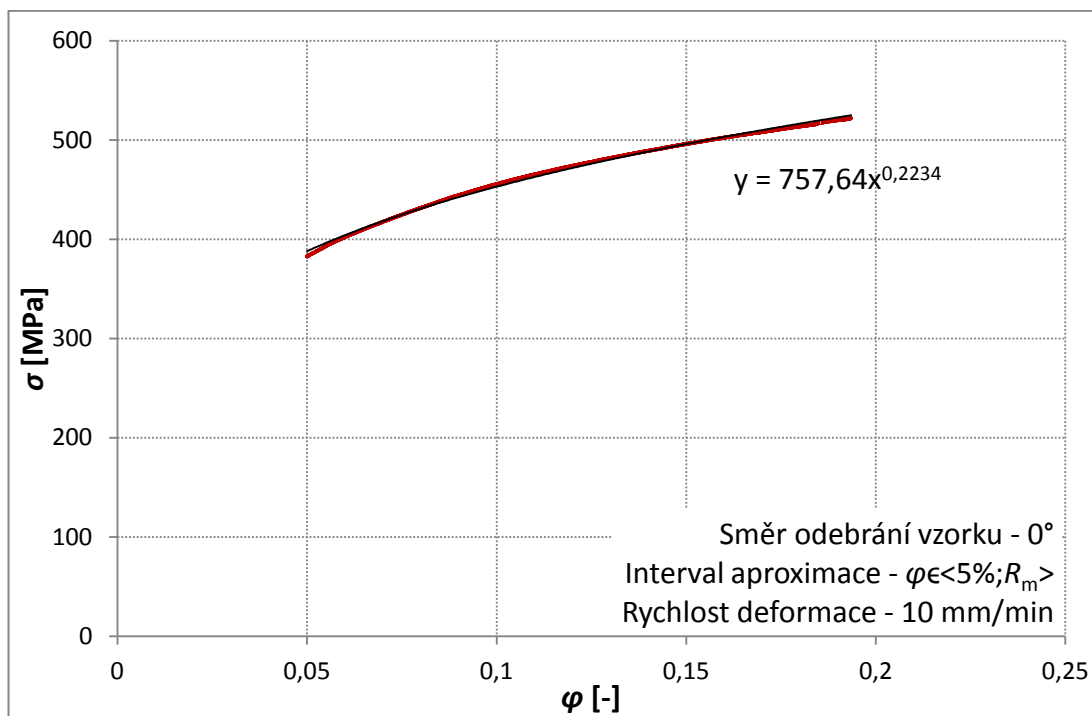
Směr odebrání	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A_{80mm} [MPa]	C [MPa]	n [MPa]	φ_0 [-]
0°	280,5	162,0	46,4	493,0	0,228	0,006
45°	287,8	170,0	42,0	497,5	0,217	0,008
90°	279,7	167,0	42,1	479,2	0,211	0,009
Průměr	-	-	-	482,8	0,218	0,008





2) Obdélníková tyč S235JR+M

Směr odebírání	R_m [MPa]	R_e [MPa]	A_{80mm} [MPa]	C [MPa]	n [MPa]	φ_0 [-]
0°	430,4	326,0	33,6	757,6	0,223	0,006



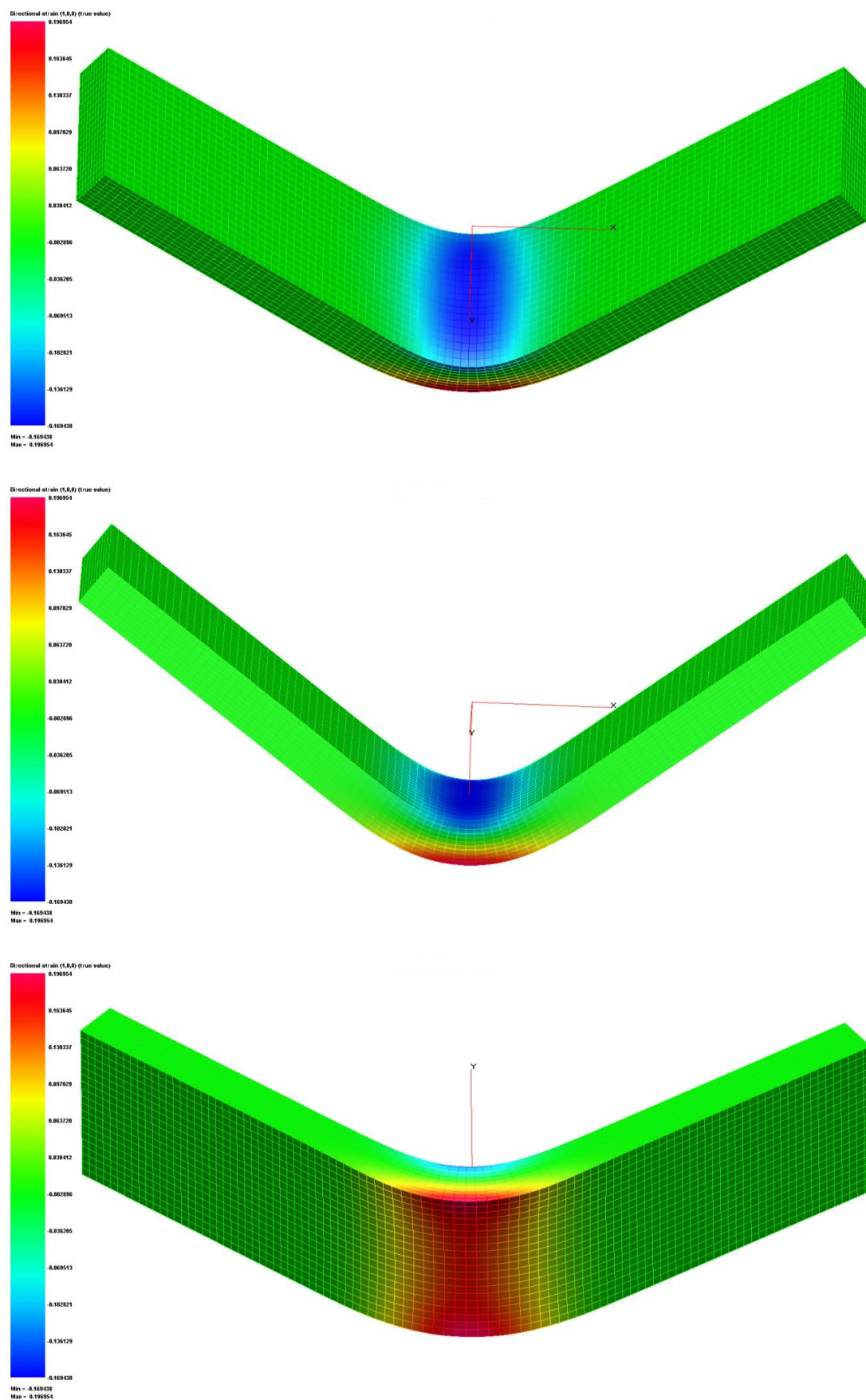
PŘÍLOHA 5: Kompletní soubor všech zobrazených tloušťek obdélníkových tyčí, řezů a pohledů rotačního kelímku

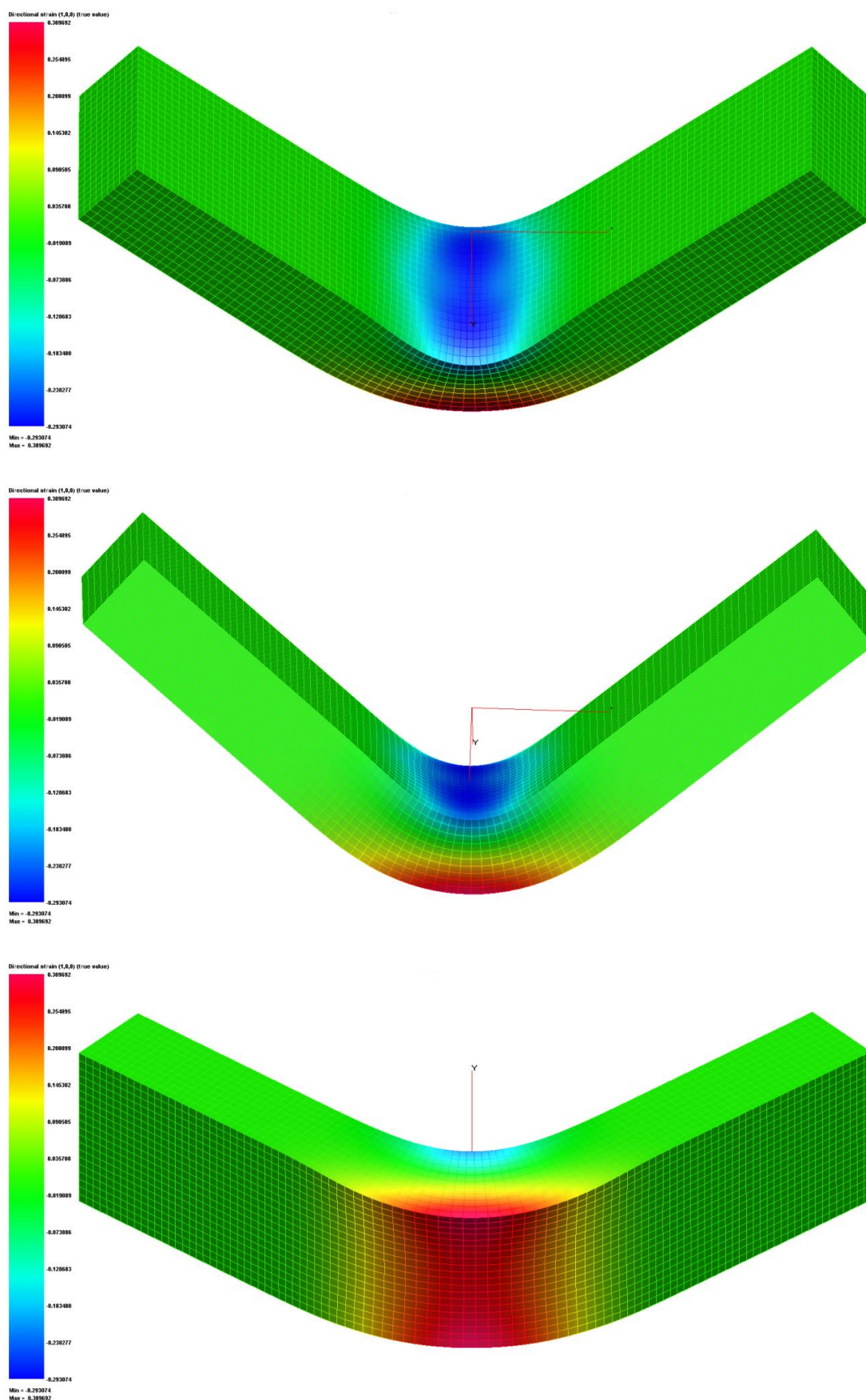
1) program PAM Stamp 2G

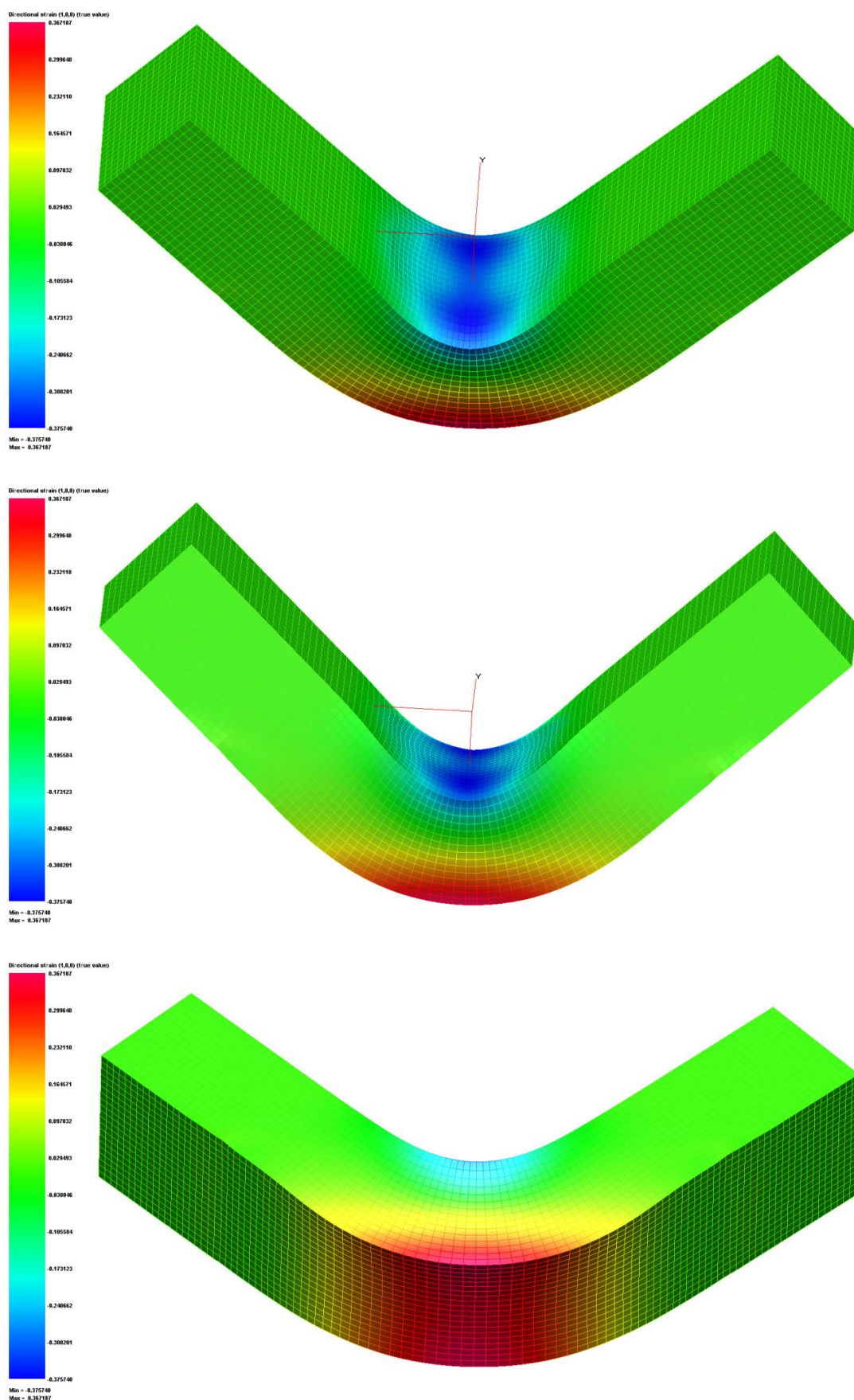
- a) Zobrazení skutečné deformace φ_1 na obdélníkové tyči tloušťky $t=5$ mm
- b) Zobrazení skutečné deformace φ_1 na obdélníkové tyči tloušťky $t=10$ mm
- c) Zobrazení skutečné deformace φ_1 na obdélníkové tyči tloušťky $t=15$ mm
- d) Zobrazení hlavního napětí φ v řezech rotačním kelímkem ve směru $0^\circ, 45^\circ$ a 90°
- e) Zobrazení hlavního napětí φ v pohledu na síť rotačního kelímku

2) program MSC.MARC/MENTAT

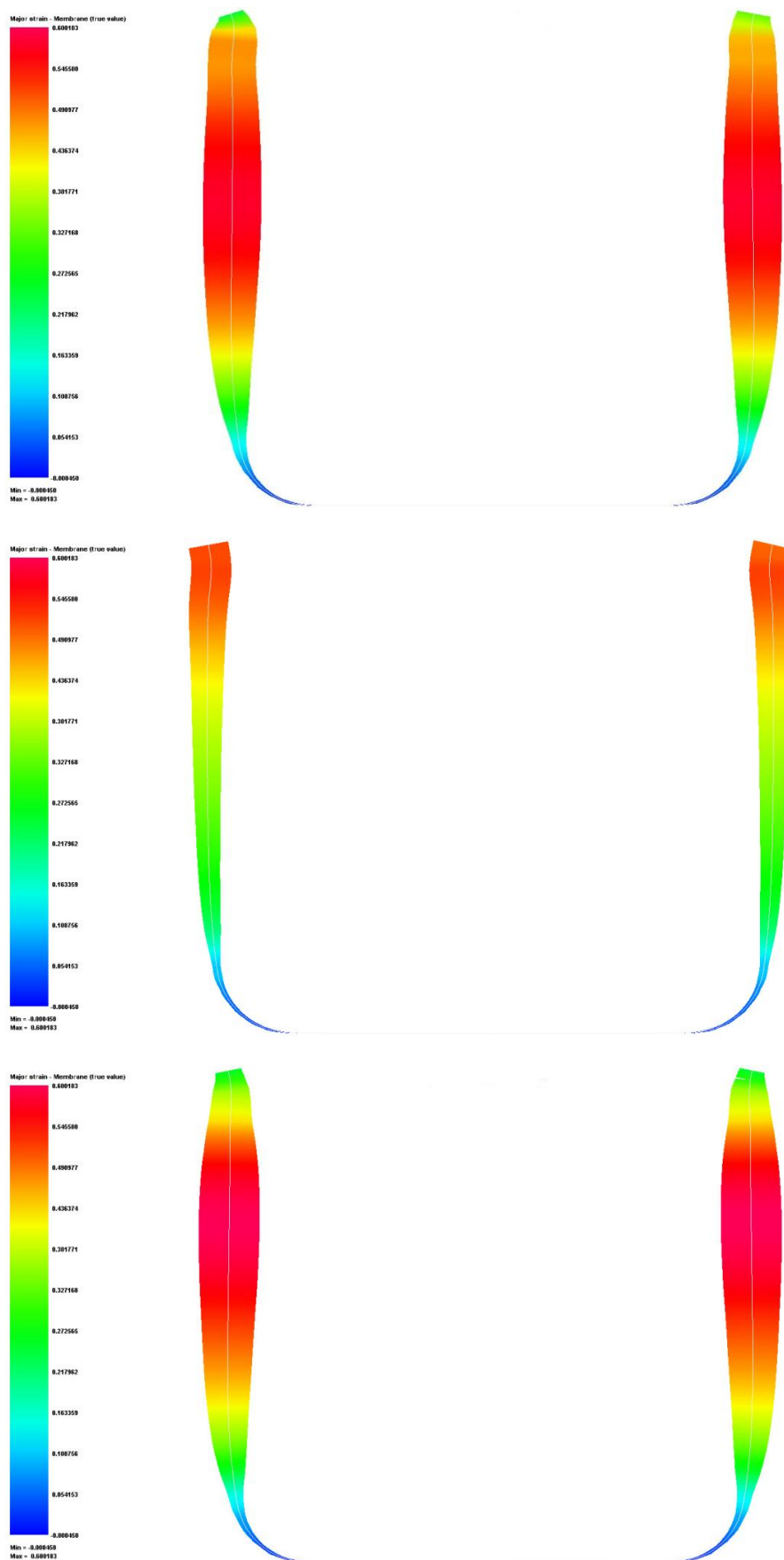
- f) Zobrazení skutečné deformace φ_1 na obdélníkové tyči tloušťky $t=5$ mm
- g) Zobrazení skutečné deformace φ_1 na obdélníkové tyči tloušťky $t=10$ mm
- h) Zobrazení skutečné deformace φ_1 na obdélníkové tyči tloušťky $t=15$ mm

a) Tloušťka obdélníkové tyče $t=5$ mm

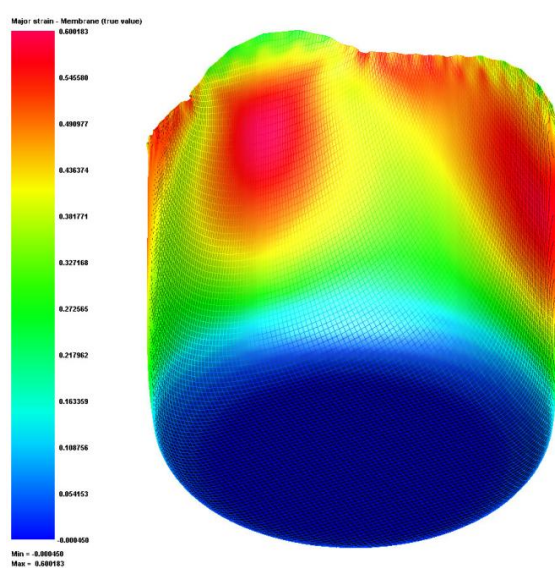
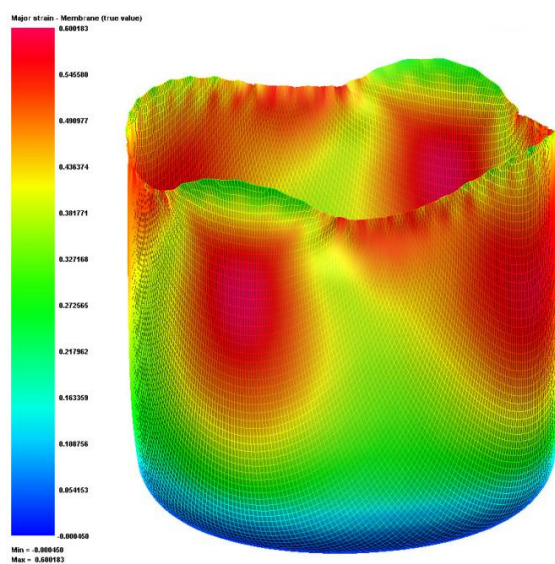
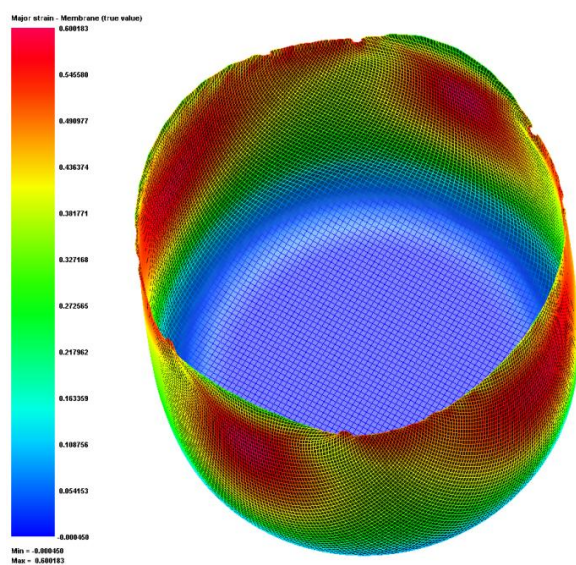
b) Tloušťka obdélníkové tyče $t=10$ mm

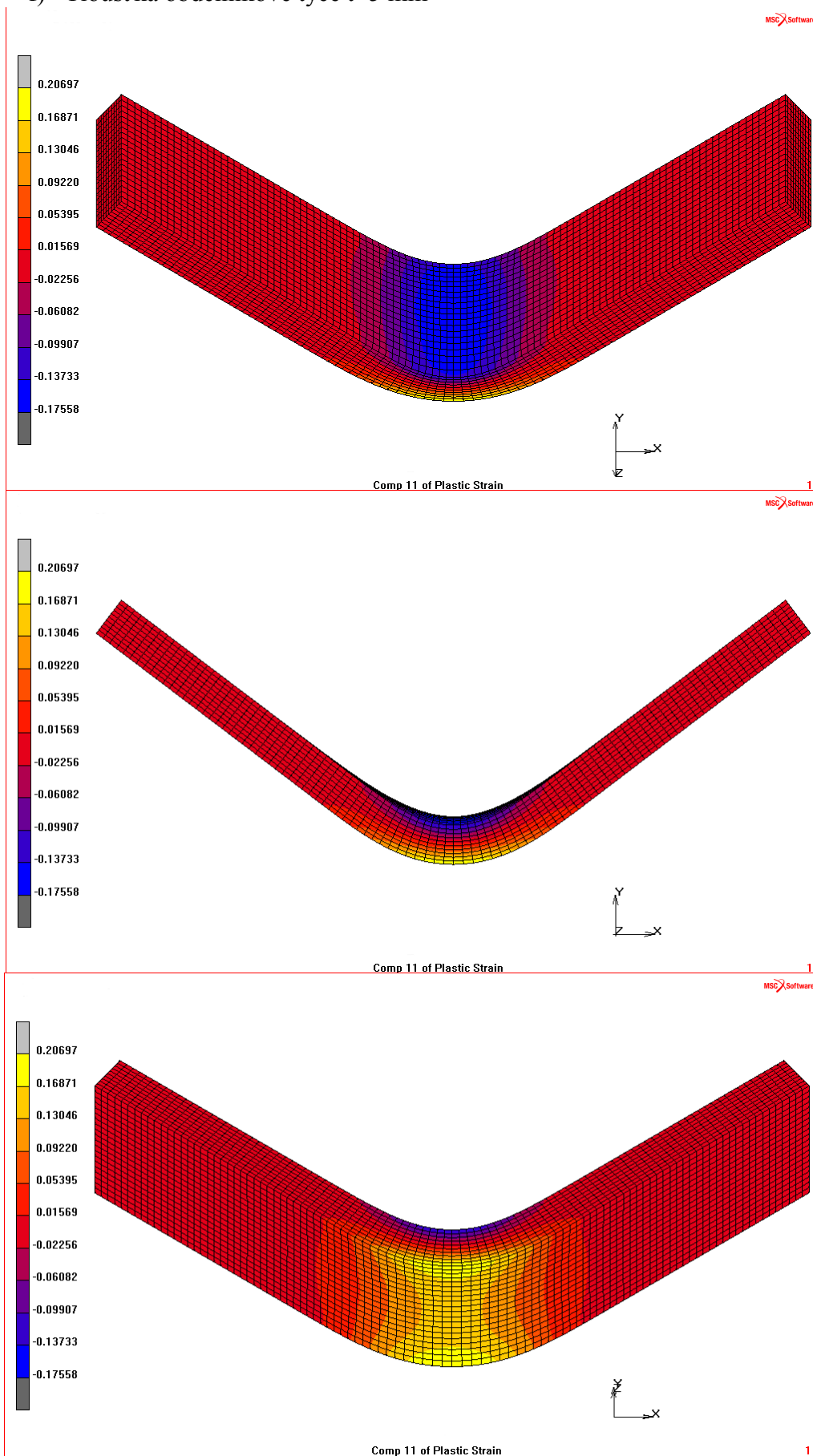
c) Tloušťka obdélníkové tyče $t=10$ mm

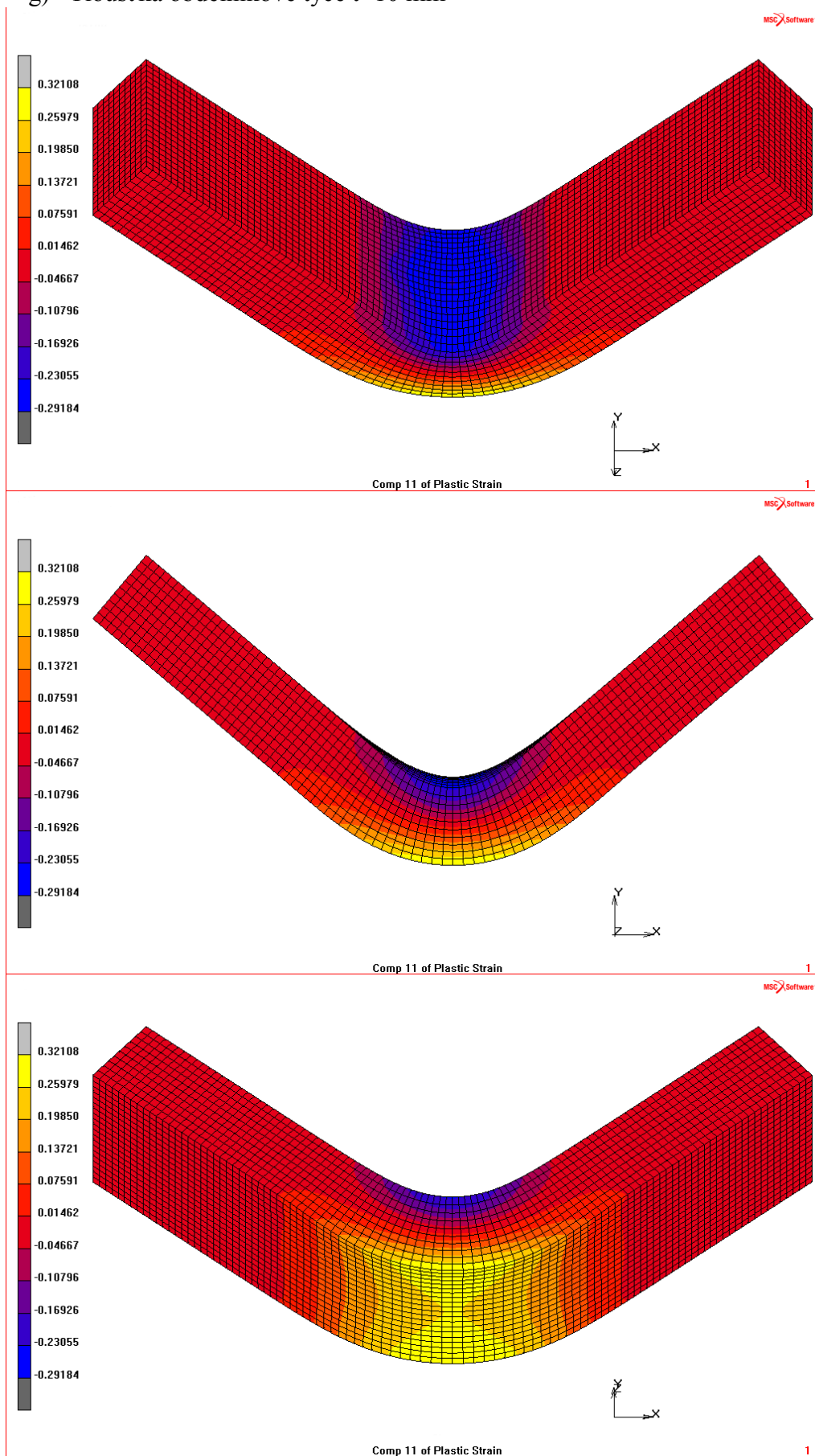
d) Řezy rotačním kelímkem ve směru 0°, 45° a 90°

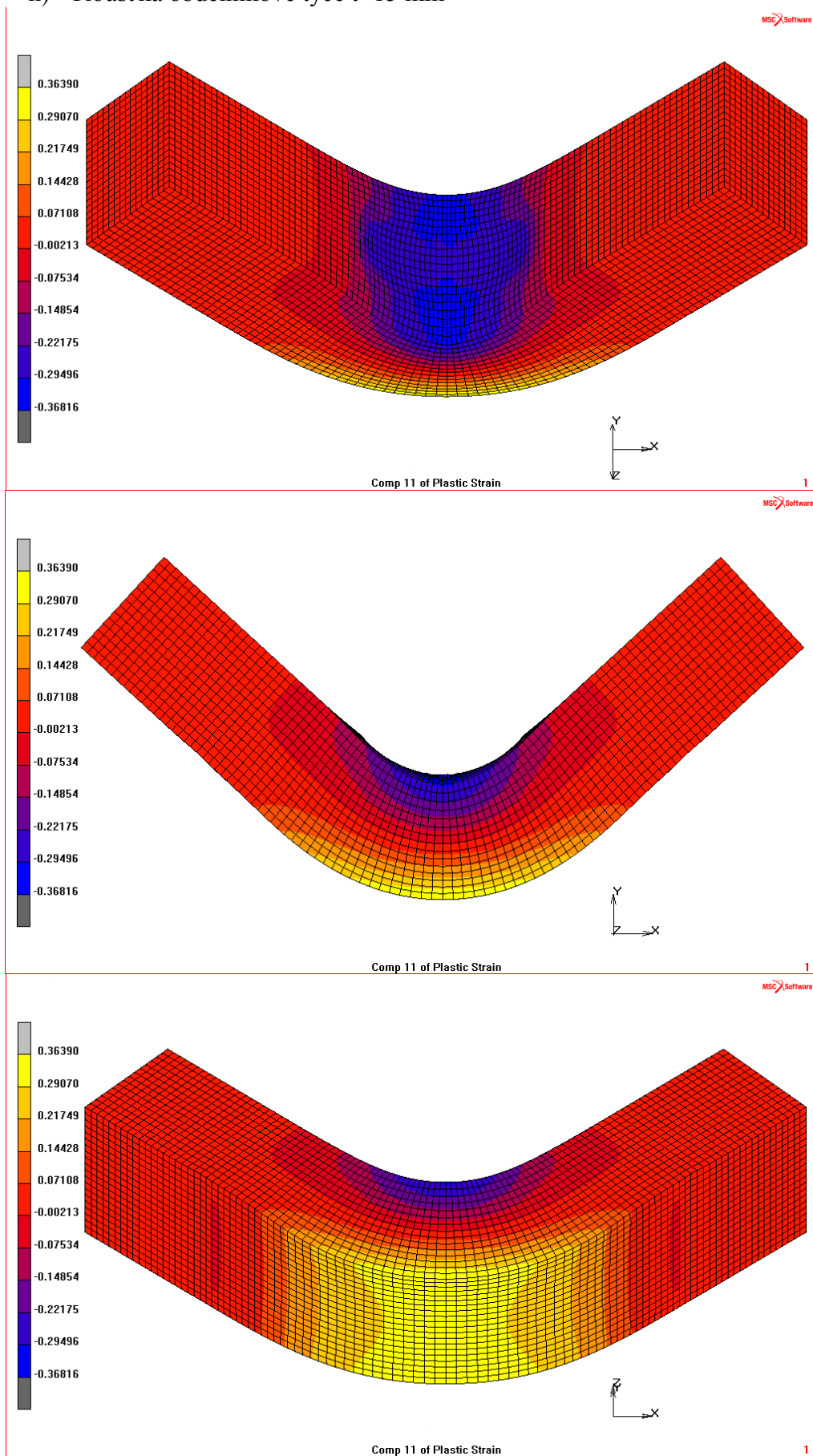


e) Pohled na síť rotačního kelímku



f) Tloušťka obdélníkové tyče $t=5$ mm

g) Tloušťka obdélníkové tyče $t=10$ mm

h) Tloušťka obdélníkové tyče $t=15$ mm

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv, užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 25.5.2012

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 25.5.2012

Signature